

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ELAINE CRISTINA CASULA ISERNHAGEN

ROCHA DE ORIGEM E POSIÇÃO DO SOLO NA PAISAGEM COMO INDICAÇÃO  
DE PROCEDÊNCIA NA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR E NO TEOR DE  
COMPOSTOS BIOATIVOS DA ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis* A. ST. HIL)

CURITIBA

2021

ELAINE CRISTINA CASULA ISERNHAGEN

ROCHA DE ORIGEM E POSIÇÃO DO SOLO NA PAISAGEM COMO INDICAÇÃO  
DE PROCEDÊNCIA NA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR E NO TEOR DE  
COMPOSTOS BIOATIVOS DA ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis* A. ST. HIL)

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias,  
Universidade Federal do Paraná, como requisito  
parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência  
do Solo.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fabiane Machado Vezzani

Coorientador: Prof. Dr Antonio Carlos Vargas  
Motta

CURITIBA

2021

Isernhagen, Elaine Cristina Casula

Rocha de origem e posição do solo na paisagem como indicação de procedência na composição elementar e no teor de compostos bioativos da erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. ST. HIL). / Elaine Cristina Casula Isernhagen. - Curitiba, 2021.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientadora: Fabiane Machado Vezzani.

Coorientador: Antonio Carlos Vargas Motta.

1. Erva-mate - Solos. 2. Geoquímica - Indicadores. 3. Compostos bioativos. 4. Cafeína. I. Vezzani, Fabiane Machado. II. Motta, Antonio Carlos Vargas. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -  
40001016014P4

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **ELAINE CRISTINA CASULA ISERNHAGEN** intitulada: **ROCHA DE ORIGEM E POSIÇÃO DO SOLO NA PAISAGEM COMO INDICAÇÃO DE PROCEDÊNCIA NA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR E NO TEOR DE COMPOSTOS BIOATIVOS DA ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil)**, sob orientação da Profa. Dra. **FABIANE MACHADO VEZZANI**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Fevereiro de 2021.

Assinatura Eletrônica

26/02/2021 12:17:12.0

FABIANE MACHADO VEZZANI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

26/02/2021 16:58:11.0

CARLOS BRUNO REISSMANN

Avaliador Externo (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA FLORESTAL)

Assinatura Eletrônica

27/02/2021 09:11:10.0

LEANDRO FLAVIO CARNEIRO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ- DPTO  
FITOTECNIA E FITOSSANITARISMO)

Assinatura Eletrônica

26/02/2021 12:24:20.0

ANTONIO CARLOS VARGAS MOTTA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

26/02/2021 13:02:16.0

DELMAR SANTIN

Avaliador Externo (PESQUISADOR AUTÔNOMO)

Rua dos Funcionários, 1540 - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 80035-050 - Tel: (41) 3350-5648 - E-mail: pgcisolo@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 77839

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>  
e insira o código 77839

Ao meu marido, Ingo Isernhagen

À minha filha, Catarina Isernhagen

Com amor, dedico.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao programa de pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná, por todo o suporte oferecido para que esse trabalho fosse possível. À Capes pela bolsa que recebi por 18 meses, período em que fiquei com dedicação exclusiva à pós-graduação. Agradeço ao professor Volnei Pauletti pelo apoio e pelas palavras de incentivo em momentos difíceis. Ao professor Antônio Carlos Vargas Motta por possibilitar esse trabalho, permitindo que eu assumisse um experimento já em andamento de seu orientado Ederlan Magri, por quem também tenho grande gratidão. Meus agradecimentos também vão para as técnicas dos laboratórios, Fabiane Gavelaki e Maria Aparecida Carvalho, ambas muito atenciosas, pacientes e dedicadas, sem as quais nós estudantes estaríamos perdidos.

Agradeço a professora Fabiane Machado Vezzani por ter aceitado ser minha orientadora e ter ficado ao meu lado, me incentivando mesmo diante de vários tropeços ocorridos no processo.

Agradeço aos meus amigos da casinha e o grupo da Balburdia cujo apoio emocional e o humor suavizaram o caminho para chegar até aqui. Agradeço em especial aos amigos Carol Amadori, Luana Celante, Dione Aguiar, Ana Paula e Zie Calabria por serem as pessoas que são, cada um ao seu modo me ajudou a superar vários momentos difíceis.

Agradeço à Nair Pires Casula, minha mãe, e à Kátia Regina Casula, minha irmã, por me mostrarem a importância da dedicação e do trabalho duro, por terem me ensinado que a frustração faz parte da vida, mas que apesar dela devemos sempre seguir em frente dando o nosso melhor e, principalmente, agradeço o afeto. Amo vocês!

Agradeço ao meu marido, Ingo Isernhagen, que há 20 anos é meu companheiro, entusiasta, crítico, cúmplice e principalmente meu melhor amigo. Muitas lágrimas foram derramadas nessa trajetória e você sempre esteve ao meu lado mesmo quando não estava fisicamente. Sem você eu jamais teria conseguido seguir em frente. Também agradeço à minha filha, Catarina Isernhagen, pela paciência, sei que suas memórias da infância foram marcadas pela mãe estudante, com prazos de entregas, horas e horas de trabalho no computador, estando

frequentemente por perto, mas sem estar por inteira, muitas vezes. O amor que tenho por vocês dois é a razão da minha vida!

“Buscas ouro nativo entre a ganga da vida. Que esperança infinita no  
ilusório trabalho...Para cada pepita, quanto cascalho” (HELENA KOLODY)



## RESUMO

Os teores de elementos e compostos secundários bioativos nos tecidos vegetais da erva-mate são características importantes seja na classificação como um alimento seguro, seja na determinação da qualidade, como um potencial superalimento. Esses aspectos da planta podem auxiliar na identificação geográfica da produção e abrir novos mercados, possibilitando maior retorno econômico da produção. Nesse contexto, faz-se necessário verificar o efeito da química do solo sobre os teores elementares e de compostos secundários bioativos no tecido vegetal de erva-mate, a fim de definir referências aos sistemas produtivos. Para tanto, amostras de solos foram coletadas em 9 sítios representativos da região de origem da erva-mate no Brasil, com rochas de origem distintas, em duas posições na paisagem, totalizando 18 solos. Cada solo foi acondicionado em quatro vasos, compondo as repetições, que receberam mudas de erva-mate do clone BR5-BRD Yary, mantidas em condição de sub-bosque por 12 meses. Após esse período, as plantas foram coletadas e separadas em frações (Folha Nova e Madura, Ramo Novo e Maduro, Casca, Lenho e Raiz). As determinações consistiram em matéria seca e teor de elementos nos tecidos. Os teores de cafeína (1,3,7 - trimetilxantina) e ácidos monocateoilquínicos (ácido 3 – cateoilquínico, ácido 4 – cateoilquínico, ácido 5 – cateoilquínico) foram determinados nas folhas maduras por cromatografia líquida. Também foi realizado o fracionamento químico dos elementos K, Mg, S, Fe, P, Al, Mn, Ba, Cu, Si e Zn nas amostras dos solos. Os resultados sinalizaram que, apesar da produção de matéria seca variar de acordo com o solo, com mínima de  $16,47 \pm 9,20$  e máxima de  $95,03 \pm 17,42$  g planta<sup>-1</sup>, alguns solos com escassez de múltiplos elementos condicionaram a produção de matéria seca similar a solos com maior disponibilidade de nutrientes, devido à plasticidade fisiológica da planta. A baixa correlação entre teores de elementos disponíveis no solo com os dos tecidos vegetais ( $r \leq 0,61$ ), somados ao baixo coeficiente de determinação das regressões múltiplas que avaliaram o efeito de todas as frações dos elementos do solo no teor de elementos da planta ( $R^2 \leq 0,65$ ), indicam que os teores de elementos no solo isoladamente não foram bons indicadores dos teores elementares no tecido da erva-mate. Apesar do teor de cafeína ter sido afetado pelas diferenças químicas no solo, os teores de elementos do solo apresentaram correlação baixa com a produção de cafeína ( $r \leq 0,40$ ) e de ácidos monocateoilquínicos ( $r \leq 0,28$ ) em erva-mate. No contexto estudado, não foi possível caracterizar aspectos do solo e da planta que indiquem identificação geográfica de produção da erva-mate.

Palavras-chave: Ionome. Indicação de procedência. Relação Solo-Planta. Ácido Cateoilquínico. Cafeína.

## ABSTRACT

The levels of bioactive secondary elements and compounds in the vegetable tissues of yerba mate are important characteristics, whether in the classification as a safe food, or in the determination of quality, as a potential superfood. These aspects of the plant can assist in the geographic identification of production and open new markets, enabling greater economic return on production. In this context, it is necessary to verify the effect of soil chemistry on the elemental levels and secondary bioactive compounds in the vegetable tissue of yerba mate, in order to define references to the production systems. For that, soil samples were collected in 9 representative sites of the region of origin of yerba mate in Brazil, with distinct rocks of origin, in two positions in the landscape, totaling 18 soils. Each soil was placed in four pots, composing the replications, which received seedlings of yerba mate from clone BR5-BRD Yary, kept in understory condition for 12 months. After this period, the plants were collected and separated into fractions (Folha Nova and Madura, Ramo Novo and Maduro, Bark, Wood and Root). The determinations consisted of dry mass and content of elements in the tissues. The levels of caffeine (1,3,7 - trimethylxanthine) and moncaffeoylquinic acids (3 - caffeoylquinic acid, 4 - caffeoylquinic acid, 5 - caffeoylquinic acid) were determined in the mature leaves by liquid chromatography. Chemical fractionation of the elements K, Mg, S, Fe, P, Al, Mn, Ba, Cu, Si and Zn was also carried out in the soil samples. The results showed that, although the dry matter production varies according to the soil, with a minimum of  $16.47 \pm 9.20$  and a maximum of  $95.03 \pm 17.42$  g plant<sup>-1</sup>, some soils with scarcity of multiple elements conditioned the production of dry matter similar to soils with greater availability of nutrients, due to the physiological plasticity of the plant. The low correlation between levels of elements available in the soil and those of plant tissues ( $r \leq 0.61$ ), added to the low coefficient of determination of multiple regressions that evaluated the effect of all fractions of soil elements on the content of plant elements ( $R^2 \leq 0.65$ ), indicate that the levels of elements in the soil alone were not good indicators of the elemental levels in the yerba mate tissue. Although the caffeine content was affected by the chemical differences in the soil, the levels of soil elements showed a low correlation with the production of caffeine ( $r \leq 0.40$ ) and moncaffeoylquinic acids ( $r \leq 0.28$ ) in yerba mate. In the studied context, it was not possible to characterize aspects of the soil and the plant that indicate geographic identification of the production of yerba mate.

Keywords: Ionome. Origin indication. Soil-plant relationship. Caffeoylquinic acid. Caffeine.

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - AGRUPAMENTOS HIERÁRQUICOS OBTIDOS POR ANÁLISES MULTIVARIADAS ENTRE OS TEORES DE ELEMENTOS DISPONÍVEIS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL. ....35
- FIGURA 2 - MATÉRIA SECA ( $\text{g Planta}^{-1}$ ) PRODUZIDA POR PLANTAS CULTIVADAS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL (a), CLUSTER HIERÁRQUICO DOS 18 SOLOS DETERMINADO POR SIMILARIDADES ENTRE TEORES ELEMENTARES DISPONÍVEIS EM CADA SOLO (S, Al, Ba, Cu, Fe, K, Mg, Mn, P, Zn E Si) (b). .....36
- FIGURA 3 - AGRUPAMENTOS HIERÁRQUICOS OBTIDOS POR ANÁLISES MULTIVARIADAS ENTRE OS TEORES MÉDIOS DE ELEMENTOS NOS TECIDOS VEGETAIS (TODAS AS FRAÇÕES) DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS COM OS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ESPÉCIE, NO SUL DO BRASIL. ....38
- FIGURA 4 - AGRUPAMENTOS HIERÁRQUICOS OBTIDOS POR ANÁLISES MULTIVARIADAS ENTRE AS MÉDIAS DAS QUANTIDADES DE ELEMENTOS POR PLANTAS CULTIVADAS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL .....39
- FIGURA 5 - CORRELAÇÕES DE PEARSON ENTRE TEORES DE ELEMENTOS NOS TECIDOS VEGETAIS DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL. ....40
- FIGURA 6 - ANÁLISE DISCRIMINANTE DE ROCHAS DE ORIGEM (BASALTO, RIODACITO E SEDIMENTAR) DE ACORDO COM OS TEORES DE ELEMENTOS EM TECIDOS MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL. ....41
- FIGURA 7 - IMPORTÂNCIA RELATIVA DE CADA FRAÇÃO SOBRE A CAPACIDADE DAS REGRESSÕES MÚLTIPLAS PREDIZEREM OS

	RESULTADOS ( $R^2$ ) DOS TEORES DE ELEMENTOS (Mn, Al, K, Zn, P e Cu) NOS TECIDOS DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS NOS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ESPÉCIE, NO SUL DO BRASIL, CONFORME MÉTODO LINDERMAN, MERENDA E GOLD (LMG). ....	42
FIGURA 8	- IMPORTÂNCIA RELATIVA DE CADA FRAÇÃO SOBRE A CAPACIDADE DAS REGRESSÕES MÚLTIPLAS PREDIZEREM OS RESULTADOS ( $R^2$ ) DAS QUANTIDADES DE ELEMENTOS ABSORVIDOS (Mn, Al, K, Zn, P e Cu) POR MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS NOS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ESPÉCIE, NO SUL DO BRASIL, CONFORME MÉTODO LINDERMAN, MERENDA E GOLD (LMG). ....	43
FIGURA 9	- IMPORTÂNCIA RELATIVA DE CADA TEOR DE ELEMENTO (Al, S, P, Ba, K, Mg, Zn, Fe, Cu, Mn, Ca e Si) EM TECIDOS DE MUDAS DE ERVA-MATE SOBRE A CAPACIDADE DAS REGRESSÕES MÚLTIPLAS PREDIZEREM OS RESULTADOS ( $R^2$ ) DOS TEORES DE Cu E Mn EM MUDAS DE ERVA-MATE MATE CULTIVADA NOS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL, CONFORME MÉTODO LINDERMAN, MERENDA AND GOLD (LMG). ....	44
FIGURA 10	- DISTRIBUIÇÃO PROPORCIONAL DE ELEMENTOS EM CADA FRAÇÃO VEGETAL DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ESPÉCIE, NO SUL DO BRASIL. ....	45
FIGURA 11	- ESQUEMA REPRESENTATIVO DOS FATORES DE TRANSLOCAÇÃO DE ELEMENTOS DO SISTEMA RADICULAR PARA PARTE AÉREA EM ERVA-MATE. ....	46
FIGURA 12	- HPLC CROMATOGRAMA DE SOLUÇÃO AQUOSA DE <i>Ilex paraguariensis</i> CULTIVADA EM SOLOS DE CASCAVEL MEIA ENCOSTA (EM PRETO) E EM ILÓPOLIS TOPO DE CATENA (EM ROSA). DETECTOR UV A 280 nm. ....	73
FIGURA 13	- AGRUPAMENTOS HIERÁRQUICOS OBTIDOS POR ANÁLISES MULTIVARIADAS ENTRE OS TEORES DE ELEMENTOS, CAFEÍNA E ÁCIDOS CAFEOLQUÍNICOS EM FOLHAS DE EM MUDAS DE	

ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL.....	78
--	----

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - DADOS BRUTOS DE TEOR DE ELEMENTOS EM FOLHAS JOVENS DE MUDAS DE ERVA-MATE ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL .....	149
QUADRO 2 - DADOS BRUTOS DE TEOR DE ELEMENTOS EM FOLHAS MADURAS DE MUDAS DE ERVA-MATE ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL .....	151
QUADRO 3 - DADOS BRUTOS DE TEOR DE ELEMENTOS EM RAMOS NOVOS DE MUDAS DE ERVA-MATE ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL .....	154
QUADRO 4 - DADOS BRUTOS DE TEOR DE ELEMENTOS EM RAMOS MADURO DE MUDAS DE ERVA-MATE ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL .....	156
QUADRO 5 - DADOS BRUTOS DE TEOR DE ELEMENTOS EM CASCA DE MUDAS DE ERVA-MATE ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL .....	159
QUADRO 6 - DADOS BRUTOS DE TEOR DE ELEMENTOS EM LENHO DE MUDAS DE ERVA-MATE ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL .....	161
QUADRO 7 - DADOS BRUTOS DE TEOR DE ELEMENTOS EM RAIZ DE MUDAS DE ERVA-MATE ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL .....	164
QUADRO 8 - DADOS BRUTOS DE MATERIA SECA TOTAL E POR FRAÇÃO DE ERVA-MATE ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL .....	166
QUADRO 9 - TEORES DE ELEMENTOS ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) SOLÚVEIS EM ÁGUA DOS 18 SOLOS DE FRAGMENTOS FLORESTAIS SOB ERVAIS NATIVOS	

(0-20 cm), REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL .....	169
---	-----



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MUNICÍPIO, LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA, MATERIAL DE ORIGEM, ALTITUDE E CLIMA DOS SÍTIOS DE COLETA DE SOLO ORIUNDOS DE REGIÃO DE OCORRÊNCIA NATURAL DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL.....	28
TABELA 2 - TEORES DE ELEMENTOS DISPONÍVEIS (mg kg <sup>-1</sup> ), A PARTIR DO FRACIONAMENTO QUÍMICO DO SOLO (SOLÚVEIS + TROCÁVEIS), NOS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL (0-20 cm) .....	34
TABELA 3 – TEOR FOLIAR DE ÁCIDO CAFEOILQUÍNICO (ACQ) E CAFEÍNA EM MUDAS DE ERVA-MATE DE ACORDO COM O SOLO ORIUNDOS DA REGIÃO DE OCORRÊNCIA NATURAL DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL .....	73
TABELA 4 - CORRELAÇÕES ENTRE TEORES DE ELEMENTOS DISPONÍVEIS NOS 18 SOLOS, REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL, E OS TEORES DE ÁCIDO CAFEOILQUÍNICO TOTAL E CAFEÍNA EM MUDAS DE ERVA-MATE. ....	74
TABELA 5 - COEFICIENTES DE MODELOS DE REGRESSÃO PARA TEORES DE CAFEÍNA E ÁCIDO CAFEOILQUÍNICO (ACQ) EM FOLHAS DE ERVA-MATE DE ACORDO COM VARIÁVEIS DOS 18 SOLOS, REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL. ....	75
TABELA 6 - CORRELAÇÕES ENTRE TEORES DE ELEMENTOS FOLIARES E TEORES DE ÁCIDO CAFEOILQUÍNICO TOTAL E CAFEÍNA EM FOLHAS DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVAS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL. ....	77
TABELA 7 - COEFICIENTES DE MODELOS DE REGRESSÃO PARA TEORES DE CAFEÍNA E ÁCIDO CAFEOILQUÍNICO TOTAL EM FOLHAS DE ERVA-MATE DE ACORDO COM TEORES DE ELEMENTOS FOLIARES DE PLANTAS CULTIVADAS EM 18 SOLOS	

REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL .....	77
TABELA 9 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DA MÉDIA DE MATÉRIA SECA PRODUZIDA POR MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM.....	139
TABELA 10 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE Ca EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM. ....	140
TABELA 11 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE K EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM. ....	141
TABELA 12 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE Mg EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM. ....	142
TABELA 13 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE P EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM. ....	143
TABELA 14 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE Mn EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM. ....	144
TABELA 15 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE Al EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM. ....	145
TABELA 16 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE Fe EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM. ....	146

TABELA 17 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE Zn EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM. ....	147
TABELA 18 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE Cu EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM. ....	148

## **LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS**

ME	- Meia Encosta
TC	- Topo da Catena
MS	- Matéria Seca
FT	- Fator de Translocação
ACQ	- Ácido Monocafeoilquínico

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>22</b>
<b>2 CAPÍTULO I: TEORES DE ELEMENTOS NAS FRAÇÕES DO SOLO COMO INDICADORES GEOQUÍMICOS DA ERVA-MATE (<i>ILEX PARAGUARIENSIS</i> A. ST. HIL)   24</b>	
2.1 RESUMO.....	24
2.2 ABSTRACT .....	25
2.3 INTRODUÇÃO .....	25
2.4 MATERIAL E MÉTODOS .....	27
2.4.1 Locais de Estudo e Coleta de Solo .....	27
2.4.2 Instalação e manutenção do experimento.....	28
2.4.3 Coleta e preparo do material de estudo .....	30
2.4.4 Fracionamento químico do solo .....	31
2.4.5 Análise do tecido vegetal.....	32
2.4.6 Análise de dados .....	33
2.5 RESULTADOS .....	33
2.5.1 Efeito da rocha de origem e da posição na paisagem sobre a química do solo e produção de matéria seca da erva-mate.....	33
2.5.2 A configuração elementar em mudas de erva-mate .....	37
2.5.3 Relação da Rocha de origem e Posição na Paisagem e a Configuração Elementar em mudas de erva-mate .....	40
2.5.4 Relação das Frações de Elementos no Solo e a Configuração Elementar em mudas de erva-mate .....	42
2.5.5 Relação da química do solo, dos teores de elementos nas frações de mudas de erva-mate e Fator de Translocação. ....	44
2.6 DISCUSSÃO .....	46
2.6.1 Efeito da rocha de origem e da posição na paisagem sobre a química do solo e a produção de matéria seca .....	46
2.6.2 A configuração elementar em mudas de erva-mate .....	48
2.6.3 Relação da Rocha de Origem e Posição na Paisagem e a Configuração Elementar em mudas de erva-mate .....	50
2.6.4 Relação das Frações de Elementos no Solo e a Configuração Elementar em mudas de erva-mate .....	50

2.6.5 Relação da química do solo, dos teores de elementos nas frações de mudas de erva-mate e Fator de Translocação. ....	52
2.7 CONCLUSÕES .....	54
2.8 REFERÊNCIAS .....	55
<b>3 CAPÍTULO II: RELAÇÃO ENTRE TEORES DE ELEMENTOS DISPONÍVEIS NO SOLO E TEORES DE COMPOSTOS SECUNDÁRIOS EM FOLHAS DE ERVA-MATE (<i>ILEX PARAGUARIENSIS</i> A. ST.-HIL) .....</b>	<b>65</b>
3.1 RESUMO.....	65
3.2 ABSTRACT .....	65
3.3 INTRODUÇÃO .....	66
3.4 MATERIAL E MÉTODOS .....	68
3.4.1 Locais de Estudo e Coleta de Solo .....	68
3.4.2 Instalação e manutenção do experimento.....	69
3.4.3 Preparo do material de estudo .....	69
3.4.4 Análise do tecido vegetal.....	70
3.4.5 Determinação das Ácidos Cafeoilquínicos e Cafeína.....	70
3.4.6 Análise química do solo.....	71
3.4.7 Análise estatística .....	71
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
3.6 CONCLUSÕES .....	80
3.7 REFERÊNCIAS.....	80
<b>4 CONCLUSÃO GERAL.....</b>	<b>88</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>88</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>89</b>
<b>APÊNDICE 1 – MATERIAL SUPLEMENTAR CAPÍTULO I.....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE 2 – FOTOS DA PREPARAÇÃO DO MATERIAL VEGETAL PARA ANÁLISE.....</b>	<b>135</b>
<b>APÊNDICE 3 – ANÁLISES POR FRAÇÃO VEGETAL.....</b>	<b>139</b>
<b>APÊNDICE 4 – DADOS BRUTOS.....</b>	<b>149</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A definição clássica de solo fértil afirma que é aquele capaz de suprir as necessidades nutricionais das plantas de forma a garantir boa produção (PATZEL et al., 2000). No entanto, as demandas nutricionais de cada espécie, e até mesmo variedades, apresentam grande variação, não sendo possível definir se um solo é quimicamente fértil sem indicar para qual espécie vegetal essa afirmativa é válida (DAOU e BILL, 2019).

A erva-mate é uma planta nativa do sul da América do Sul e, apesar de ser um produto com grande importância histórica e econômica nessa região, sofreu baixa pressão de seleção em programas de melhoramento genético (WENDLING et al., 2018), mantendo muitas características oriundas da sua adaptação natural aos fatores edafoclimáticos da região de origem.

A alta tolerância da erva-mate a solos com baixo pH e elevada saturação por Al é reflexo dessa adaptação aos solos da sua região de origem (RICARDI et al., 2020). A espécie desenvolve-se bem em solos que seriam considerados de baixa fertilidade para outras espécies cultivadas, como a soja ou o milho, por exemplo (REISSMANN et al., 1983; RADOMSKI et al., 1992; LOURENÇO et al., 1999; CARVALHO, 2003; BAQUY et al., 2018).

No entanto, pH baixo aumenta a biodisponibilidade de alguns elementos traços (CAO et al., 2001; GALHARDI et al., 2020; SMOLDERS et al., 2020) que podem ser tóxicos para a planta e para o consumidor final (ANDERSEN et al., 2018). Não só o pH, mas também a interação entre os diversos elementos no solo, a origem desses solos e a sua posição na paisagem podem afetar os teores de elementos disponíveis (MA et al., 2011; ANDA et al., 2012; ARTUR et al., 2014; BARBOSA et al., 2018; BURGHELEA et al., 2018). A absorção e a translocação desses elementos pela planta influenciam a qualidade do produto comercial (DUCAT e QUINÁIA, 2004; BRAGANÇA et al., 2011; BARBOSA et al., 2015; BARAN et al., 2018; VALDUGA et al., 2019; BARBOSA et al., 2020; OLIVARI et al., 2020).

Estudos vêm demonstrando que é possível identificar a região de origem da erva-mate a partir dos teores de elementos nos tecidos vegetais encontrados em produtos comerciais adquiridos em mercados locais (MARCELO et al., 2014; CANIZA et al., 2020). Neste contexto, surgem questionamentos de pesquisa: Seriam os teores de elementos disponíveis nos solos os principais responsáveis por essa



identificação de origem? Até que ponto os teores de elementos no solo determinam a produção de matéria seca e o teor de elementos nos tecidos da planta?

Outro fator que interfere na qualidade da erva-mate, especialmente em seus produtos derivados na linha de fármacos e energéticos, é o teor de compostos secundários bioativos. A produção de compostos secundários é uma resposta fenológica da interação entre o potencial genético da planta e o ambiente (GOBBONETO e LOPES, 2007; GIORGI et al., 2009; ISAH, 2019). Entre os compostos bioativos mais importantes estão os fenólicos, como ácidos monocateoiquínicos, flavonóides, cafeína, theobromina e taninos (LUTOMPSKI et al., 2013). Altos teores desses compostos nos tecidos vegetais pode proporcionar maior rendimento industrial para segmentos de mercados diferenciados (ISOLABELLA et al., 2010). Esse cenário, conduz à pergunta de pesquisa: As diferentes concentrações de elementos nos solos seriam capazes de alterar os teores de compostos secundários bioativos em folhas de erva-mate?

Tendo em vista um mercado cada vez mais exigente quanto à segurança dos alimentos e à qualidade dos produtos, o objetivo desse trabalho foi verificar o efeito da química do solo sobre os teores elementares e de compostos secundários bioativos no tecido vegetal de erva-mate, a fim de definir a contribuição do solo na assinatura química da planta.

## 2 CAPÍTULO I: TEORES DE ELEMENTOS NAS FRAÇÕES DO SOLO COMO INDICADORES GEOQUÍMICOS DA ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis* A. ST. HIL)

### 2.1 RESUMO

A indicação geográfica de produtos agroindustriais é uma estratégia comercial importante para conquista e fidelização de novos mercados. Os teores elementares da erva-mate vêm se mostrando um bom indicador de procedência, mas os fatores que levam ao estabelecimento da configuração elementar do produto comercial ainda não estão totalmente esclarecidos. Para verificar o efeito da química do solo sobre os teores elementares em mudas de erva-mate, amostras de solos foram coletadas em 9 sítios, com rochas de origem distintas, em duas posições na paisagem, totalizando 18 solos. Cada solo foi acondicionado em quatro vasos, compondo as repetições, que receberam mudas de erva-mate do clone BR5-BRD Yary, mantidas em condição de sub-bosque por 12 meses. Após esse período, as plantas foram coletas e separadas em frações (Folha Nova e Madura, Ramo Novo e Maduro, Casca, Lenho e Raiz), nas quais a matéria seca e o teor de elementos nos tecidos foram determinados. Realizou-se o fracionamento químico dos elementos K, Mg, S, Fe, P, Al, Mn, Ba, Cu, Si e Zn dos solos. Os resultados sinalizaram que, apesar da produção de matéria seca variar de acordo com o solo, com mínima de  $16,47 \pm 9,20$  e máxima de  $95,03 \pm 17,42$  g planta<sup>-1</sup>, alguns solos com escassez de múltiplos elementos condicionaram a produção de matéria seca similar a solos com maior disponibilidade de nutrientes, devido à plasticidade fisiológica da planta. Os teores de elementos químicos nos tecidos da erva-mate não corresponderam de forma direta aos teores de elementos no solo, com  $r \leq 0,40$  para a maioria dos elementos, excetuando-se K e Zn que obtiveram  $r$  na faixa de 0,60. O coeficiente de determinação das regressões múltiplas que avaliaram o efeito de todas as frações dos elementos do solo no teor de elementos da planta, com  $R^2 \leq 0,48$  para a maioria dos elementos, com exceção para Mn ( $R^2 = 0,65$ ), indica que a dinâmica de mobilização das frações mais recalcitrantes influenciaram os resultados, mas com impactos distintos de acordo com o solo. Além disso, os controles fisiológicos da erva-mate sobre a absorção e a translocação de elementos afetaram a configuração elementar dos tecidos. Os teores de elementos do solo isoladamente não foram bons indicadores dos teores elementares da erva-mate, sendo assim seu uso como referência para indicação de procedência se mostrou limitado.

Palavras-chave: Ionome. Indicação de procedência. Relação Solo-Planta. Adaptação Fisiológica.

## 2.2 ABSTRACT

The geographical indication of agro-industrial products is an important commercial strategy for winning and retaining new markets. The elementary levels of yerba mate have been shown to be a good indicator of origin, but the factors that lead to the establishment of the elementary configuration of the commercial product are not yet fully understood. In order to verify the effect of soil chemistry on the elemental levels in yerba mate seedlings, soil samples were collected in 9 sites, with different origin rocks, in two positions in the landscape, totalling 18 soils. Each soil was placed in four pots, making up the replications, which received seedlings of yerba mate from clone BR5-BRD Yary, kept in understory condition for 12 months. After this period, the plants were collected and separated into fractions (New Leaves and Old, New and Old Branch, Bark, Wood and Root), in which the dry matter and the content of elements in the tissues were determined. Chemical fractionation of the elements K, Mg, S, Fe, P, Al, Mn, Ba, Cu, Si and Zn of the soils was carried out. The results showed that, although the dry matter production varies according to the soil, with a minimum of  $16.47 \pm 9.20$  and a maximum of  $95.03 \pm 17.42$  g plant<sup>-1</sup>, some soils with a shortage of multiple elements conditioned the production of dry matter similar to soils with greater availability of nutrients, due to the physiological plasticity of the plant. The levels of chemical elements in yerba mate tissues did not correspond directly to the levels of elements in the soil, with  $r \leq 0.40$  for most elements, except for K and Zn that obtained  $r$  in the range of 0.60. The coefficient of determination of the multiple regressions that evaluated the effect of all fractions of soil elements on the content of plant elements, with  $R^2 \leq 0.48$  for most elements, except for Mn ( $R^2 = 0.65$ ), indicates that the dynamics of mobilization of the most recalcitrant fractions influenced the results, but with different impacts according to the soil. In addition, the yerba mate's physiological controls on the absorption and translocation of elements affected the elementary configuration of the tissues. The levels of soil elements alone were not good indicators of the elemental levels of yerba mate, so its use as a reference for indication of provenance was limited.

Keywords: Ionome. Origin indication. Soil-plant relationship. Physiological Adaptation.

## 2.3 INTRODUÇÃO

Relacionar a qualidade de um produto alimentício com uma determinada região de origem é uma prática cada vez mais comum no ramo agroindustrial. A indicação geográfica pode gerar nichos de mercado, aumentando a lucratividade na comercialização, assim como dar indicativos sobre o valor nutricional e sobre a segurança do alimento (KATERINOPOULOU et al., 2020). Nos últimos anos, muitos trabalhos têm demonstrado alta relação entre teores de elementos nos produtos comercializados de ervas usadas em infusões, como a erva-mate e o chá verde, com suas regiões de origem (MARCELO et al., 2014; POZEBON et al., 2015; LI et al., 2018; NI et al., 2018; MILANI et al., 2019; CANIZA et al., 2020).

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* A.St.-Hil.) é uma planta arbórea nativa da região meridional da América do Sul, encontrada naturalmente no sul do Brasil, Paraguai e Argentina (ROSSA, 2013). Planta muito consumida na forma de infusões, tem um papel cultural histórico para os povos da região (BRACESCO et al., 2011; GERHARDT, 2011), além de apresentar diversas propriedades medicinais que despertam cada vez mais interesses farmacológicos (BERTÉ, 2011; MÁRQUEZ et al., 2013; LIMA et al., 2016; GERKE et al., 2018).

A área de ocorrência natural da erva-mate dentro do território brasileiro é de aproximadamente 450.000 km<sup>2</sup> (TATSCH et al., 2010), nos quais há presença de solos de diferentes origens, graus de intemperismo e níveis de fertilidade (GARDI et al., 2015). Para sobreviver nessas condições tão variadas de solo, a erva-mate construiu mecanismos adaptativos para se desenvolver em solos com baixo pH, baixos teores de cátions trocáveis e altos teores de Al (ROSSA, 2013). A plasticidade fenotípica gerada nessa adaptação evolutiva permite que um dado genótipo ocupe ambientes muito distintos (CÁSSIA-SILVA et al., 2017).

Os teores de elementos na erva-mate são influenciados por fatores como o clima da região produtora (MARCELO et al., 2014), processos de industrialização (GIULIAN et al., 2009), nível de sombreamento (JACQUES et al., 2007), cultivar (OLIVA et al., 2014; BARBOSA et al., 2018), época de colheita (BASTOS et al., 2018) e o manejo nutricional (SANTIN et al., 2013; BARBOSA et al., 2018), além dos próprios teores de nutrientes inerentes ao solo onde a planta é cultivada (TOPPEL et al., 2018; MOTTA et al., 2020). O solo é a principal fonte dos elementos que constituem os tecidos da planta e por isso, possivelmente o maior responsável pelas diferenças na configuração elementar de uma dada espécie.

As características químicas dos solos são influenciadas por alguns fatores abióticos, como a rocha de origem, clima e relevo. Em uma mesma região é possível encontrar solos provenientes de mais de uma rocha de origem e em várias posições no relevo, fazendo com que os teores de nutrientes dos solos possam apresentar grande variação.

Nossa hipótese é que em solos não antropizados, representativos da região de origem da erva-mate, a absorção de elementos químicos pela planta e a produção de matéria seca são subordinados aos teores de elementos disponíveis no solo, sendo um fator importante na indicação de procedência.

No presente estudo, o fator solo foi isolado dos demais fatores que podem influenciar os teores elementares nos tecidos da erva-mate, para verificar a possibilidade do solo ser um indicador geoquímico. Especificamente, foi analisado: (i) Efeito da rocha de origem e posição na paisagem na química dos solos e dessa, por sua vez, na produção de matéria seca da erva-mate; (ii) Como os teores de elementos disponíveis no solo, a rocha de origem, a posição na paisagem e a mobilização de elementos das diferentes frações dos elementos no solo afetam os teores de elementos nos tecidos vegetais; (iii) A influência da química do solo na translocação de elementos em mudas de erva-mate.

## 2.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.4.1 Locais de Estudo e Coleta de Solo

O estudo foi desenvolvido a partir do cultivo de mudas clonais de erva-mate em solos oriundos de duas posições na paisagem de regiões de ocorrência natural da espécie. Os locais de coleta de solo foram de regiões de ocorrência natural da erva-mate, entre as latitudes 21° a 30°S e longitudes 48° a 56°W (ROSSA, 2013), inseridos dentro do domínio do bioma Mata Atlântica, especialmente da fitofisionomia florestal caracterizada como Floresta Ombrófila Mista (FOM), popularmente conhecida como Floresta ou Mata com Araucária (OLIVEIRA E ROTTA 1983; IBGE, 2012).

As coletas foram feitas em 9 sítios com materiais de origem variados, como basalto, riodacito, argilito, arenito e folhelho, que possuem características químicas de solo distintas, em áreas de floresta secundária nativa que sofrem atividade extrativista de erva-mate com ausência de práticas de correções de solo ou adubações (TABELA 1).

Em cada sítio foi selecionada uma catena, de onde foram coletados solos no topo da catena (TC), com relevo plano, sem presença de cascalhos, e na posição de meia encosta (ME), apresentando cascalhos na superfície do terreno. O intuito dessa coleta foi avaliar a variação dentro de cada sítio, uma vez que o relevo é um importante fator de formação de solo, interferindo no grau de desenvolvimento desse. Os solos foram coletados na profundidade de 0 a 20 cm, previamente triados em campo, retirando-se raízes e cascalhos. A caracterização química do solo, a partir da análise de rotina, pode ser observada em S23 (Apêndice 1). O delineamento

experimental foi em blocos casualizados, de fatorial 9 x 2 (9 sítios X 2 posições na paisagem) e com 4 repetições, totalizando 72 vasos cada um contendo uma muda de erva-mate.

TABELA 1 - MUNICÍPIO, LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA, MATERIAL DE ORIGEM, ALTITUDE E CLIMA DOS SÍTIOS DE COLETA DE SOLO ORIUNDOS DE REGIÃO DE OCORRÊNCIA NATURAL DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL.

Município	Latitude	Longitude	Material de Origem	Altitude (m)	Clima <sup>1</sup>
Barão de Cotegipe – RS	27°33'50.57"S	52°24'4.01"O	Basalto – Ígneo	854	Cfa
Cascavel – PR	25° 2'14.34"S	53°19'30.36"O	Basalto – Ígneo	738	Cfa
Seara – SC	27°10'42.15"S	52°18'33.98"O	Basalto – Ígneo	507	Cfa
Cruz Machado – PR	25°59'3.96"S	51°20'28.70"O	Basalto – Ígneo	1142	Cfb
Ilópolis – RS	28°54'50.89"S	52° 7'52.38"O	Riodacito – Ígneo	731	Cfa
Faxinal do Céu – PR	25°54'19.24"S	51°35'13.06"O	Riodacito – Ígneo	1179	Cfb
Fernandes Pinheiro – PR	25°25'16.29"S	50°33'52.45"O	Argilito – Sedimentar	859	Cfb
São João do Triunfo – PR	25°43'31.22"S	50°17'52.17"O	Arenito – Sedimentar	809	Cfb
Mallet – PR	25°56'42.59"S	50°42'40.01"O	Folhelho – Sedimentar	791	Cfb

FONTE: O autor (2021).

<sup>1</sup> Definição conforme classificação de Köppen.

#### 2.4.2 Instalação e manutenção do experimento

Cada amostra de solo foi peneirada em malha de 4 mm, homogeneizado e depositado em vasos plásticos com volume de 7 L de solo, todos revestidos internamente com plásticos novos não recicláveis para evitar eventual contaminação.

Mudas clonais da cultivar de erva-mate BR5-BRD Yary (WENDLING et al., 2016), produzidas em tubetes, com cerca de 12 cm de altura, tiveram seus substratos originais removidos e foram transplantadas para os vasos no dia 21 de março de 2018. As plantas foram cultivadas por 12 meses, em condição de sub-bosque, em Curitiba-PR, no sul do Brasil. O clima da região do cultivo das mudas é classificado, segundo sistema de Köppen, como Cfb, subtropical mesotérmico, superúmido, com verões frescos e presença de geadas, sem estação seca (ALVARES et al., 2013). A temperatura média anual é de 16,5 °C, com média do mês mais quente e mais frio de 20,1 °C e 12,8 °C, respectivamente. A precipitação anual fica em torno de 1.500 mm ano<sup>-1</sup>, tendo janeiro como o mês de maiores precipitações; e agosto, o de menores (MAACK, 2012). O solo sob cultivo foi

mantido próximo à capacidade de campo, por água das chuvas e regas com água de torneira.



#### 2.4.3 Coleta e preparo do material de estudo

No dia 25 de março de 2019, um ano e quatro dias após o plantio, separou-se a parte aérea do sistema radicular, fazendo-se um corte com tesoura de poda na base da planta (FOTO 1 – Apêndice 2). Ramos e folhas foram classificados, considerando: ramo maduro aquele com casca suberizada, de coloração marrom-acinzentada, com menor flexibilidade e/ou diâmetro superior a 3 mm; ramo jovem aquele com casca verde (claro ou escuro), mais flexível e com diâmetro inferior a 3 mm; folha madura, aquela de coloração verde-escuro, completamente expandida e de consistência rígida; folha jovem, aquela de coloração verde-claro, consistência tenra ou não completamente expandida (FOTO 3 – Apêndice 2).

Cada parte foi pesada separadamente e lavada abundantemente com água de torneira, enxaguada duas vezes com água deionizada e secas ao ar por cerca de 3-4 h sob bancada. Em seguida, as folhas jovens e maduras foram secas, separadamente, em micro-ondas por 3 minutos e armazenadas em sacos de papel pardo. Esse método de secagem das folhas permite melhor conservação de compostos bioativos, segundo TOMASI (2020).

Selecionou-se o segmento de ramo maduro, constituinte do colo da planta, com cerca de 7-8 cm de comprimento (quando presente) para separar o lenho da casca (periderme do ramo) (FOTO 5 – Apêndice 2). Os ramos jovens, maduros, lenho e casca foram armazenados em sacos de papel pardo e secos em estufa com circulação de ar a 50° C, até massa constante.

O sistema radicular das plantas foi separado do solo através do destorroamento cuidadoso, para evitar rompimentos e perdas de raízes, e separação manual das raízes (FOTO 6 – Apêndice 2).

Após retirada das plantas, o solo foi passado em peneira de malha de 4 mm, para resgate de partes das raízes que pudessem ter sido perdidas no destorroamento. As raízes foram então colocadas sobre uma peneira de 1,5 mm e lavadas abundantemente com água de torneira para remoção do excesso de solo aderido (FOTO 7 – Apêndice 2). As raízes foram novamente lavadas com água de torneira, até remoção de todo resíduo perceptível de solo e submersas em solução de EDTA-Na 0,2 mol L<sup>-1</sup> por 15 min (FOTO 8 – Apêndice 2), para extração de metais adsorvido nas superfícies das raízes, método adaptado de XIAO-JUAN et al. (2011). Depois de enxaguadas duas vezes com água deionizada e secas ao ar, em

bancada, por 6-8 h foram acondicionadas em sacos de papel pardo para secagem em estufa com circulação de ar forçado a 50° C, até peso constante.

Foi obtida a matéria seca de todo o material. A moagem foi realizada em moedor de grãos de café até passar por peneira de 0,149 mm (FOTO 9 e 10 – Apêndice 2); ramos e raízes passaram previamente em moinho de facas e o lenho fracionado com estilete.

#### 2.4.4 Fracionamento químico do solo

Foi efetuado o fracionamento químico de K, Mg, S, Fe, P, Al, Mn, Ba, Cu, Si e Zn nas amostras dos solos, quantificando os teores dos elementos nas frações: solúvel, trocável, associada à matéria orgânica, associada a óxidos de Fe e Al amorfos, associada a óxidos de Al cristalino e minerais 1:1 e 2:1, e residual, além dos teores pseudo-totais, conforme metodologia adaptada por KUMMER et al. (2011).

Foram adicionados 2 g de terra fina seca ao ar em tubo de polipropileno com capacidade de 100 mL. A digestão das amostras foi efetuada de forma sequencial, com a utilização dos seguintes extratores e tempo de extração: 1) Fração solúvel – 10 mL de H<sub>2</sub>O ultrapura (Milli-Q). Esta solução foi agitada por 30 min, centrifugada e lavada; 2) Forma trocável – 20 mL de Ca(NO<sub>3</sub>) 0,5 mol L<sup>-1</sup>. Esta solução foi agitada por 1 h, centrifugada e efetuada a lavagem do resíduo; 3) Associada à matéria orgânica – 20 mL da mistura de solução H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 30% (v/v) e HNO<sub>3</sub> 0,02 mol L<sup>-1</sup>. Esta solução permaneceu em repouso por 60 min e em banho maria a 70° C por mais 120 min, seguido de centrifugação e lavagem do resíduo; 4) Associada a óxidos de Fe e Al amorfos – 40 mL de solução extratora com Oxalato de Amônio 0,2 mol L<sup>-1</sup>, Ácido Oxálico 0,2 mol L<sup>-1</sup> e Ácido Ascórbico 0,1 mol L<sup>-1</sup>. Esta solução foi agitada por 4 h no escuro, centrifugada e efetuada a lavagem do resíduo; 5) Óxidos de Al cristalino e minerais 1:1 e 2:1 – 40 mL de NaOH 1,25 mol L<sup>-1</sup>. A solução permaneceu em banho maria por 1 h, posteriormente foi centrifugada e lavado o resíduo; 6) Residual – Pseudo-total – 9 mL de HNO<sub>3</sub> concentrado, 3 mL de HCl concentrado e 1 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Esta solução foi submetida a forno de micro-ondas a 180 °C por 20 min e posteriormente passada em filtro quantitativo de filtragem lenta.

Os extratos foram analisados por espectroscopia de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado – ICP-AES (Varian, 720-ES).

#### 2.4.5 Análise do tecido vegetal

A digestão das amostras vegetais foi conduzida em forno de micro-ondas, marca Milestone, modelo ETHOS 1, conforme MOTTA et al. (2020). Em 200 mg de amostra de tecido vegetal, foram adicionados 4 mL de ácido nítrico 65% P.A., 3 mL de água ultra-pura e 1 mL de peróxido de hidrogênio, em um tubo de polipropileno. Os tubos foram fechados e submetidos ao micro-ondas a 180 °C por 20 min e, posteriormente, os extratos foram passados em filtro quantitativo de filtragem lenta. Os extratos foram analisados por espectroscopia de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado – ICP-AES (Varian, 720-ES). Para certificação da metodologia e leitura, foi utilizado padrão analítico GBW-10016 *Camellia sinensis* (índice de recuperação em materiais complementares – S1 em Apêndice 1). Apenas elementos com índice de recuperação entre 85 e 110% foram utilizados para as demais análises, sendo eles Ba, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, P, S e Zn.

O teor de elementos no tecido vegetal por muda (mg/g) foi obtido a partir da equação 1:

Teor de elementos no tecido vegetal =

$$\begin{aligned} &[(\text{Teor na folha madura} * \text{Matéria seca da folha madura}) + \\ &(\text{Teor na folha nova} * \text{Matéria seca da folha nova}) + \\ &(\text{Teor no ramo maduro} * \text{Matéria seca do ramo maduro}) + \\ &(\text{Teor no ramo novo} * \text{Matéria seca do ramo novo}) + \\ &(\text{Teor na casca} * \text{Matéria seca da casca}) + \\ &(\text{Teor no lenho} * \text{Matéria do lenho}) + \\ &(\text{Teor na raiz} * \text{Matéria seca da raiz})] / \\ &(\text{Matéria seca da folha madura} + \\ &\text{Matéria seca da folha nova} + \text{Matéria seca do ramo maduro} + \\ &\text{Matéria seca do ramo novo} + \text{Matéria seca da casca} + \\ &\text{Matéria seca do lenho} + \text{Matéria seca da raiz}) \end{aligned}$$

Onde:

Os teores de elementos foram calculados em mg de elemento por kg de planta e matérias secas em kg, resultando em mg de elemento por kg de planta

Já a quantidade de elementos por planta foi calculada a partir da equação 2:

$$\begin{aligned} \text{Quantidade de elemento por planta} = & \\ & [(\text{Teor na folha madura} * \text{Matéria seca da folha madura}) + \\ & (\text{Teor na folha nova} * \text{Matéria seca da folha nova}) + \\ & (\text{Teor no ramo maduro} * \text{Matéria seca do ramo maduro}) + \\ & (\text{Teor no ramo novo} * \text{Matéria seca do ramo novo}) + \\ & (\text{Teor na casca} * \text{Matéria seca da casca}) + \\ & (\text{Teor no lenho} * \text{Matéria do lenho}) + \\ & (\text{Teor na raiz} * \text{Matéria seca da raiz})] \end{aligned}$$

Onde:

Os teores de elementos foram calculados em mg de elemento por kg de planta e matérias secas em kg, resultando em mg de elemento por planta

#### 2.4.6 Análise de dados

O fator de translocação foi determinado pela razão entre o teor do elemento na folha madura e teor do elemento na raiz. A normalidade dos dados foi testada por meio do teste de Shapiro-Wilk, e a homocedasticidade, através do teste de Bartlett. Os dados que não apresentaram normalidade e/ou homocedasticidade foram transformados por Box-Cox, para atender aos critérios da ANOVA. Nos casos em que a ANOVA indicou diferenças significativas entre os tratamentos, foi utilizado o teste Tukey de comparação de médias. Quando mesmo com a transformação dos dados não houve atendimento aos pré-requisitos da ANOVA, utilizou-se o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido por Dunn Test quando  $p < 0,05$ . Análises multivariadas foram realizadas para obtenção de agrupamentos hierárquicos e regressões múltiplas a fim de verificar a relação entre os teores de elementos no solo e no tecido vegetal. As análises dos dados foram efetuadas no *software* R (R Core Team 2017).

## 2.5 RESULTADOS

### 2.5.1 Efeito da rocha de origem e da posição na paisagem sobre a química do solo e produção de matéria seca da erva-mate

Os 18 solos analisados apresentaram diferenças em relação aos teores elementares disponíveis, influenciados pelas rochas de origem e pelas posições na paisagem (FIGURA 1).

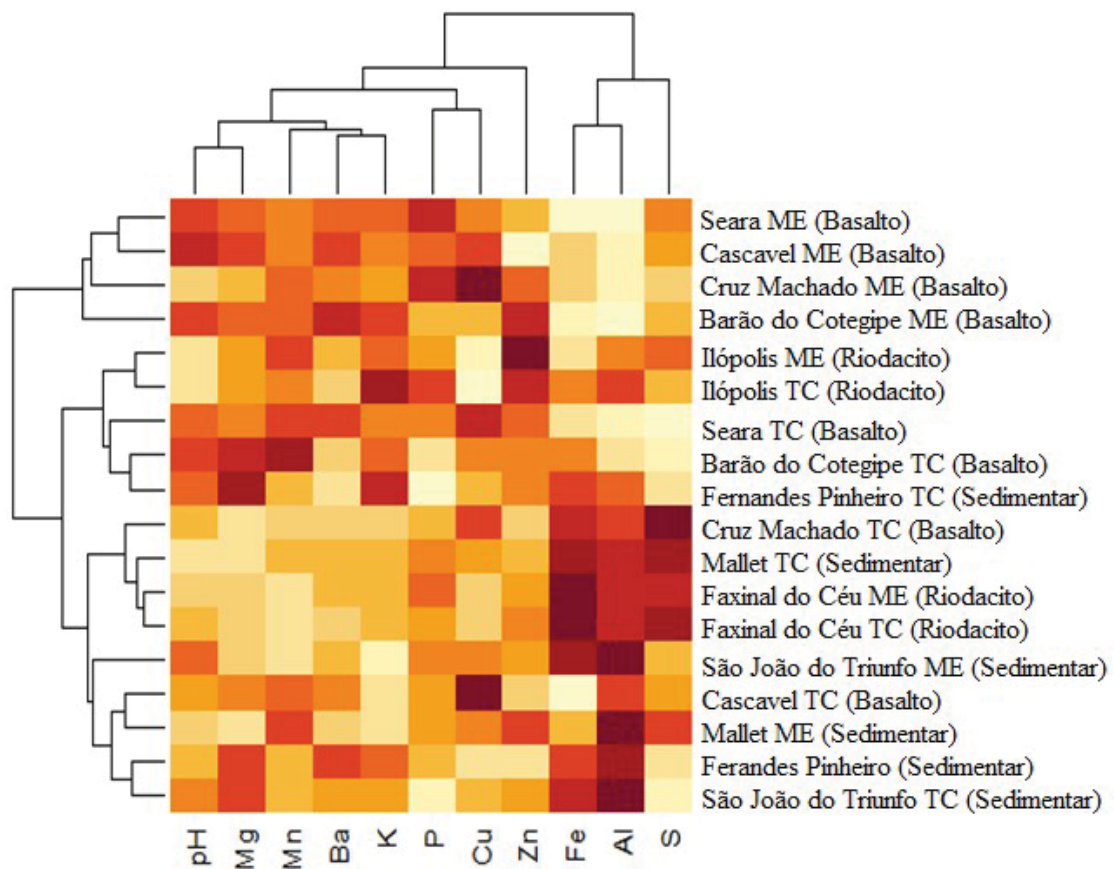
TABELA 2 - TEORES DE ELEMENTOS DISPONÍVEIS ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), A PARTIR DO FRACIONAMENTO QUÍMICO DO SOLO (SOLÚVEIS + TROCÁVEIS), NOS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL (0-20 cm)

Solo	S	Al	Ba	Cu	Fe	-----( $\text{mg kg}^{-1}$ )-----				Mn	P	Si	Zn	pH ( $\text{CaCl}_2$ )	MO <sup>(1)</sup> (%)
Barão Cotegipe ME	28,48	1,37	69,89	0,06	1,16	524,66	234,43	240,79	1,31	30,53	3,69	5,33	9,68		
Barão Cotegipe TC	22,09	17,95	4,26	0,07	8,94	217,85	211,47	238,21	0,87	30,40	1,12	4,58	4,40		
Cascavel ME	34,96	5,57	53,43	0,15	4,48	317,70	386,69	127,53	2,54	32,56	0,19	5,85	10,87		
Cascavel TC	27,84	97,62	7,19	0,12	1,53	95,60	77,39	57,21	1,21	11,86	0,49	3,87	8,15		
Cruz Machado ME	36,54	58,44	25,93	0,21	13,62	316,21	171,98	290,75	3,79	42,71	2,50	3,69	12,21		
Cruz Machado TC	56,05	327,58	2,99	0,11	28,55	97,05	27,22	11,35	1,08	14,84	0,49	4,46	14,19		
Faxinal do Céu ME	46,22	312,44	4,09	0,01	35,76	110,56	31,93	7,50	2,02	10,58	0,88	3,43	15,22		
Faxinal do Céu TC	42,85	275,84	1,90	0,01	27,34	102,74	24,37	7,49	1,21	11,09	0,93	3,55	7,57		
Fernandes Pinheiro ME	22,99	227,42	10,54	0,01	10,73	204,55	122,22	22,72	1,05	13,86	0,44	3,82	6,67		
Fernandes Pinheiro TC	25,13	78,15	3,20	0,04	12,67	265,75	184,00	28,51	0,72	17,37	1,04	4,24	8,46		
Ilópolis ME	38,79	137,52	7,48	0,01	3,93	278,67	91,37	147,27	1,70	11,35	3,09	3,73	7,57		
Ilópolis TC	31,09	154,75	5,79	0,02	9,33	342,46	82,18	61,73	2,07	9,80	1,69	3,76	11,89		
Mallet ME	34,50	196,79	3,29	0,05	4,42	91,15	29,80	60,03	1,16	12,98	1,25	3,56	4,13		
Mallet TC	48,00	307,40	4,44	0,05	28,15	115,26	24,37	29,51	1,66	10,92	0,62	3,38	7,86		
São João Triunfo ME	19,10	118,98	1,09	0,01	7,31	40,46	14,77	3,10	0,81	3,80	0,25	3,63	6,67		
São João Triunfo TC	20,31	118,90	2,84	0,01	7,64	112,06	71,13	14,02	0,54	6,20	0,52	3,76	7,86		
Seara ME	41,99	1,08	39,43	0,12	0,93	539,71	386,77	209,64	4,45	29,62	0,90	5,74	6,40		
Seara TC	21,72	13,64	16,86	0,12	4,43	204,54	120,55	143,38	1,68	22,57	1,54	4,49	11,25		

FONTE: O Autor (2021)

TC – Topo de Catena e ME – Meia encosta; 1 – Obtido a partir do método colorimétrico

FIGURA 1 - AGRUPAMENTOS HIERÁRQUICOS OBTIDOS POR ANÁLISES MULTIVARIADAS ENTRE OS TEORES DE ELEMENTOS DISPONÍVEIS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL.

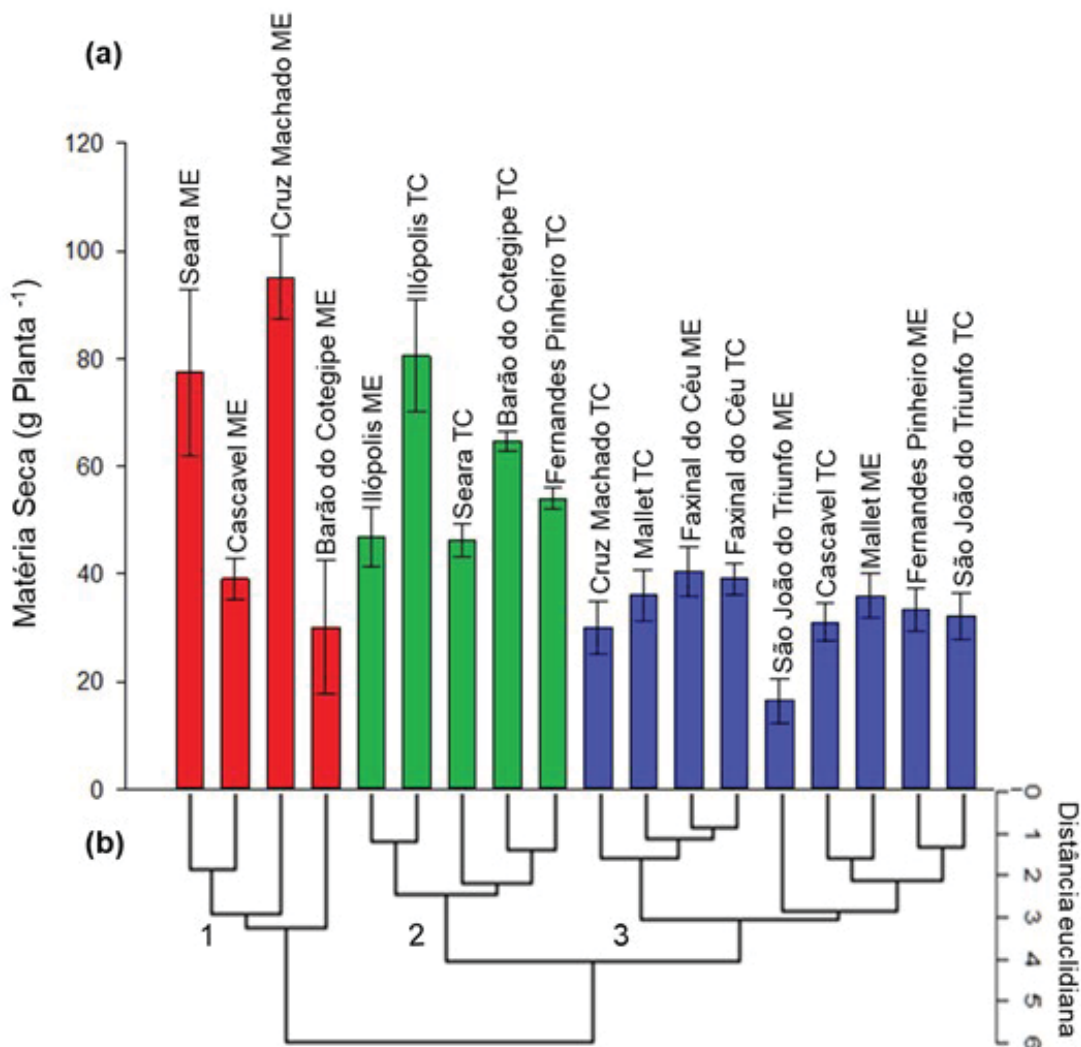


FONTE: O autor (2021).

Cada elemento tem sua respectiva escala de cor, em que o valor mais alto de cada elemento é considerado 100% com cor mais intensa e gradativamente diminui até o valor mais baixo e cor pálida. TC – Topo de Catena e ME – Meia Encosta, entre parênteses encontra-se o tipo de rocha de origem de cada solo.

A produção de matéria seca da erva-mate foi afetada pelas diferenças químicas entre os solos (FIGURA 2, S2 e S3 em Apêndice 1). A FIGURA 2 mostra o agrupamento dos solos de acordo com suas similaridades em relação aos teores de elementos disponíveis no solo (b) e o efeito sobre a produção de matéria seca (a). Os solos do grupo 1 (em vermelho) – de origem basáltica, com maiores teores de nutrientes disponíveis e pH mais elevado em relação aos demais, como os de Cascavel ME e Barão do Cotegipe ME – induziram a produção de matéria seca similares aos solos do grupo 3 (em azul), com alta saturação por Al, baixo pH e baixos teores de nutrientes.

FIGURA 2 - MATÉRIA SECA (g Planta<sup>-1</sup>) PRODUZIDA POR PLANTAS CULTIVADAS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL (a), CLUSTER HIERÁRQUICO DOS 18 SOLOS DETERMINADO POR SIMILARIDADES ENTRE TEORES ELEMENTARES DISPONÍVEIS EM CADA SOLO (S, Al, Ba, Cu, Fe, K, Mg, Mn, P, Zn E Si) (b).



FONTE: O autor (2021).

TC – Topo da Catena e ME – Meia Encosta. Grupo 1 – em vermelho – solos de origem ígnea básica e pouco intemperizados, com teores mais elevados de nutrientes; Grupo 2 – verde - solos com rocha de origens ígneas e sedimentares, com teores intermediários de K e Mg; Grupo 3 – azul – solos com rochas de origem ígneas e sedimentares com alta saturação por Al e baixos teores de nutrientes.

O teor disponível de Zn em Cascavel ME foi o menor entre todos os solos analisados (0,19 mg kg<sup>-1</sup>), acarretando um teor em folhas maduras de 31,14 ± 11,80 mg kg<sup>-1</sup>, o segundo mais baixo nesse estudo, ficando atrás apenas de plantas cultivadas com solo de São João do Triunfo TC (TABELA 16 em Apêndice 3). Os teores foliares para Zn em erva-mate normalmente estão na faixa de 11 a 180 mg kg<sup>-1</sup> (BARBOSA et al., 2015; MAGRI et al., 2020; MOTTA et al., 2020; TOPPEL et al., 2018; OLIVA et al., 2014). O solo de Barão do Cotegipe ME apresentou teores



mais baixos de P em relação aos demais solos do grupo 1 (1,31 mg kg<sup>-1</sup> de solo) e a relação P/Zn mais baixa entre todos os solos analisados (0,35).

Os solos dos grupos 3 (azul) - condicionaram a produções de matéria seca inferiores apenas aos solos de Cruz Machado ME (grupo 1) e Ilópolis TC (grupo 2) (S3 em Apêndice 1).

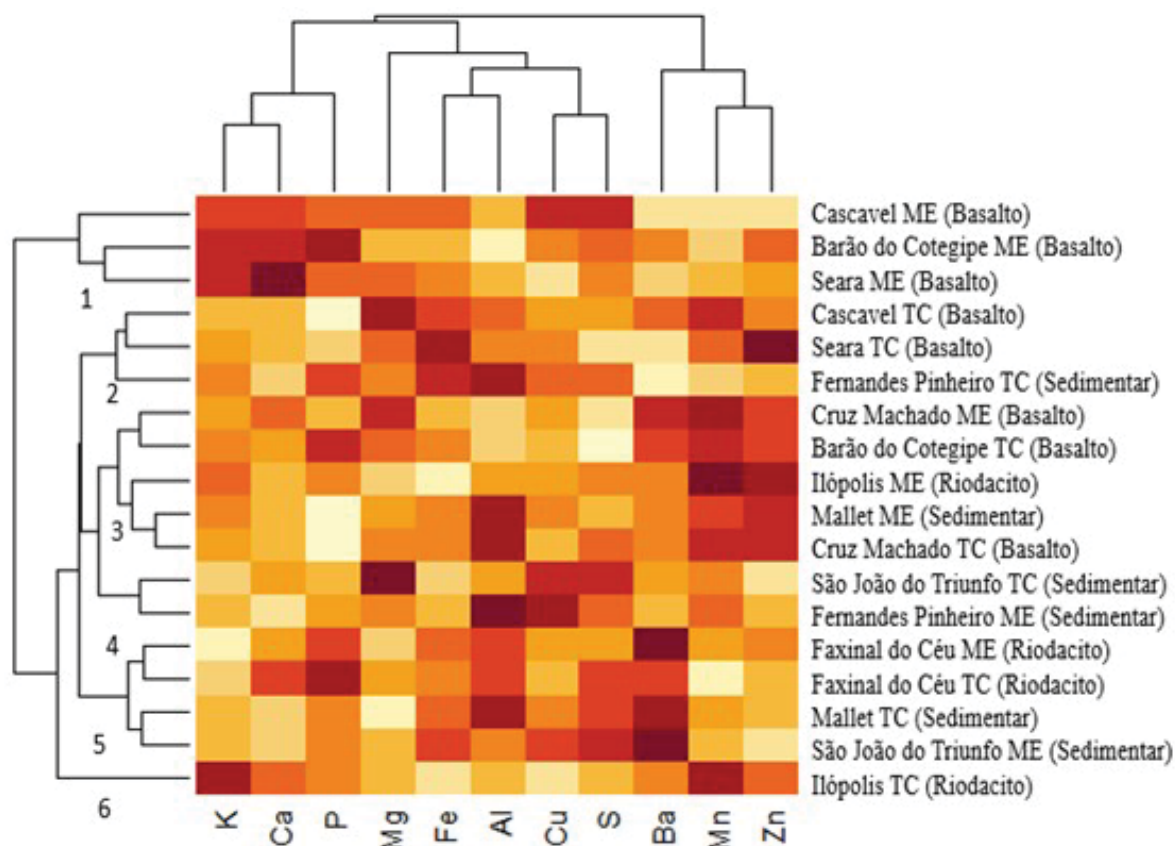
As correlações entre matéria seca da erva-mate e os teores de K, Mn, P e Si disponíveis nos solos foram moderadas, com *r* de 0,56, 0,60, 0,61 e 0,56, respectivamente, e *p*<0,001 (S4 em Apêndice 1).

#### 2.5.2 A configuração elementar em mudas de erva-mate

As características químicas dos solos afetaram os teores de elementos nos tecidos da erva-mate (FIGURA 3 e S5 em Apêndice 1), bem como a quantidade total de cada elemento na planta (FIGURA 4 e S6 em Apêndice 1). No entanto, esses teores, de forma geral, seja levando em consideração a planta como um todo (folhas + ramos + lenho + casca + raízes), seja avaliando as partes separadamente, apresentaram baixa correlação com a maioria dos teores de elementos disponíveis no solo, excetuando-se K e Zn, com correlações moderadas (S7 em Apêndice 1).

A baixa correlação entre teor de elemento no solo e na planta pode ser observada para Mn em solos Ilópolis TC e Cruz Machado TC, por exemplo. Nesses, os teores de Mn foram relativamente baixos, tanto na fração disponível quanto nas demais frações (S9 a S12 em Apêndice 1), e no tecido foram relativamente altos. E o mesmo aconteceu para Cu, cujos teores de todas as frações do solo foram baixos para Fernandes Pinheiro e São João do Triunfo, independentemente da posição na paisagem, e os teores de Cu nos tecidos foram relativamente altos (13,76±1,16 e 13,72± 2,02 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente), assim como na quantidade total de Cu absorvido pela planta.

FIGURA 3 - AGRUPAMENTOS HIERÁRQUICOS OBTIDOS POR ANÁLISES MULTIVARIADAS ENTRE OS TEORES MÉDIOS DE ELEMENTOS NOS TECIDOS VEGETAIS (TODAS AS FRAÇÕES) DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS COM OS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ESPÉCIE, NO SUL DO BRASIL.

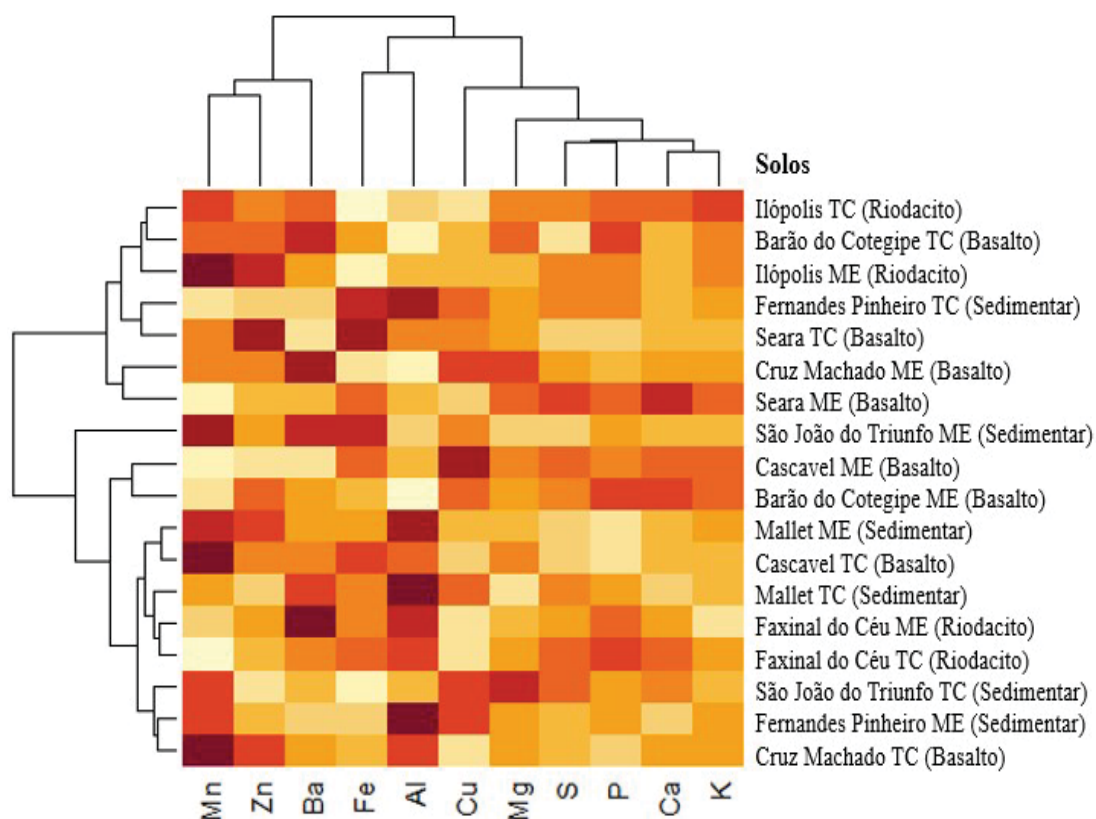


FONTE: O autor (2021).

Cada elemento tem sua respectiva escala de cor, em que o valor mais alto de cada elemento é considerado 100% com cor mais intensa e gradativamente diminui até o valor mais baixo e cor pálida. TC – Topo de Catena e ME – Meia Encosta, entre parênteses encontra-se o tipo de rocha de origem de cada solo. À esquerda encontra-se o agrupamento por similaridade entre os teores elementares dos tecidos de plantas cultivadas em cada solo: Grupo 1 – Tecidos vegetais com altos teores de K, Ca e P (Solos de origem basáltica); Grupo 2 – Tecidos vegetais com teores elevados de Fe (Solos de origens sedimentar e basáltica); Grupo 3 – Tecidos vegetais com altos teores de Mn e Zn (Solos de origens ígneas e sedimentares); Grupo 4 – Tecidos vegetais com altos teores de Cu e baixos teores de Ca, K e P (Solos de origem sedimentar); Grupo 5 – Tecidos vegetais com altos teores de Ba e baixos teores de Zn (Solos de origens riodacíticas e sedimentares); Grupo 6 – Tecidos vegetais com alto teor de K e Mn (Solo riodacítico).

As correlações entre teores de elementos disponíveis no solo com a quantidade absorvida pelas plantas foram maiores do que para teores nos tecidos (S7 e S8 em Apêndice 1). Teores disponíveis de K, Mg, Mn, P e Zn apresentaram correlações moderadas a fortes com a quantidade total de elementos absorvidos por cada planta (S8 em Apêndice 1). A quantidade de micronutrientes absorvida sofreu maior variação de acordo com os solos do que para os macronutrientes (FIGURA 4).

FIGURA 4 - AGRUPAMENTOS HIERÁRQUICOS OBTIDOS POR ANÁLISES MULTIVARIADAS ENTRE AS MÉDIAS DAS QUANTIDADES DE ELEMENTOS POR PLANTAS CULTIVADAS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL

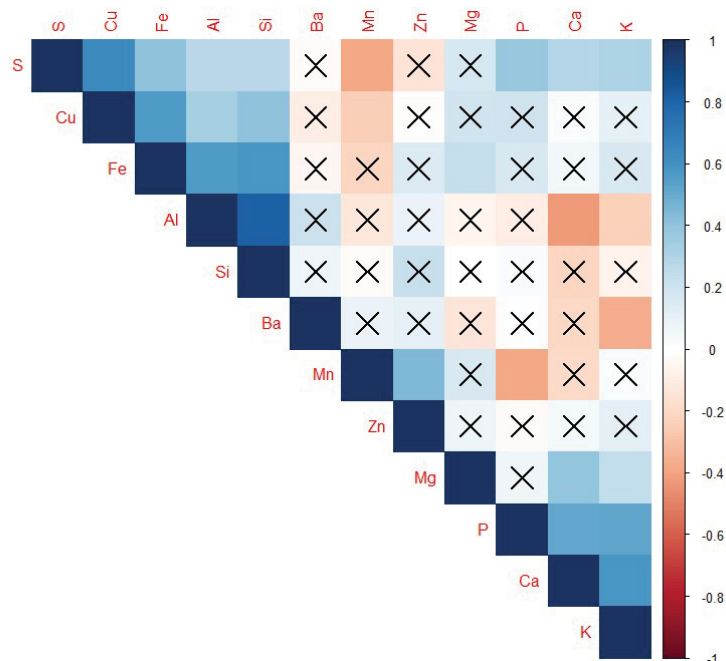


FONTE: O autor (2021).

Cada elemento tem sua respectiva escala de cor, em que o valor mais alto de cada elemento é considerado 100% com cor mais intensa e gradativamente diminui até o valor mais baixo e cor pálida. TC – Topo de Catena e ME – Meia Encosta, entre parênteses encontra-se o tipo de rocha de origem de cada solo.

Nos tecidos de erva-mate, a correlação entre os teores de Ca, P, K e S foi positiva e moderada (FIGURA 5), embora, em folhas maduras, os teores de Ca e P tenham se correlacionado negativamente (S19 em Apêndice 1). Entre Cu, Fe, Al, Si e S as correlações foram de moderadas a fortes. Os teores de Mn se correlacionaram negativamente com S, Cu e P, e positivamente com teores de Zn. Teores de K apresentaram correlação negativa com teores de Ba e Al, além disso, teores de Al também se correlacionaram negativamente com teores de Ca (FIGURA 5). As quantidades totais absorvidas por planta apresentaram correlações fortes e positivas entre os macronutrientes analisados (S, K, P, Ca e Mg) e Fe, Al e Si, e correlações fracas entre os micronutrientes (Mn, Zn e Cu) e os demais elementos (S13 em Apêndice 1). As quantidades absorvidas de Zn e Mn correlacionaram-se de forma forte e positiva (S13 em Apêndice 1).

FIGURA 5 - CORRELAÇÕES DE PEARSON ENTRE TEORES DE ELEMENTOS NOS TECIDOS VEGETAIS DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL.



FONTE: O autor (2021).

Correlações marcadas com X não foram significativas ( $p > 0,05$ ). Escala em tons de azul indicam correlações positivas e em vermelho indicam correlações negativas. De 111 a 10,91 - muito forte; de 10,91 a 10,71 - forte; de 10,71 a 10,51 - moderada; 10,51 a 10,31 - fraca; e de 10,31 a 0 - desprezível.

### 2.5.3 Relação da Rocha de origem e Posição na Paisagem e a Configuração

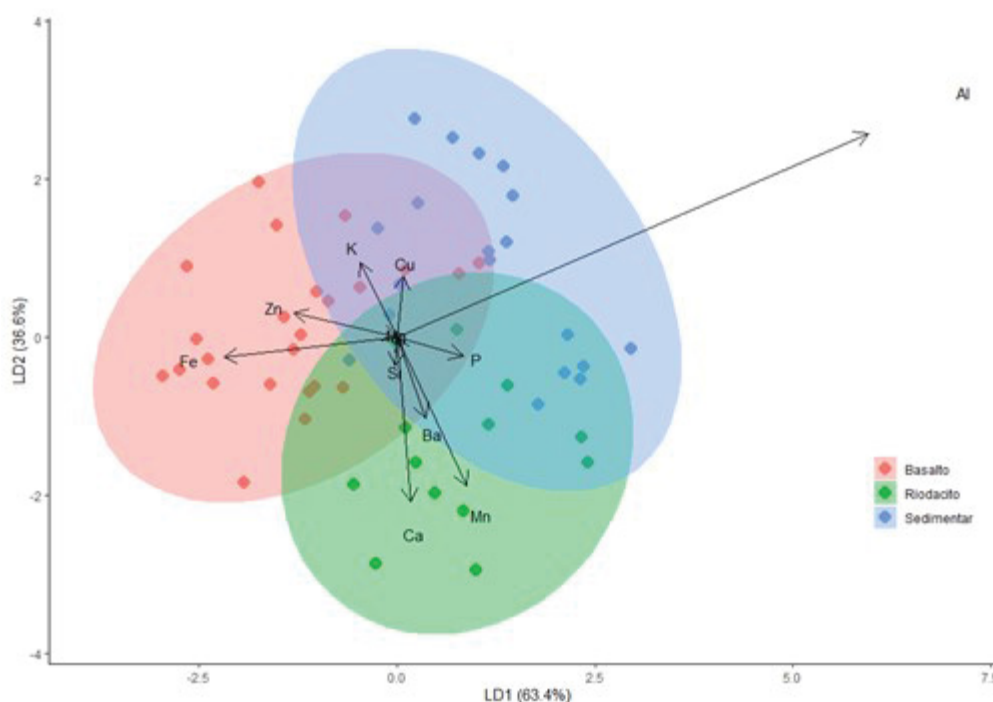
#### Elementar em mudas de erva-mate

A rocha de origem influenciou os teores de elementos disponíveis no solo que, por sua vez, imprimiram efeito sobre o teor de elementos nas mudas de erva-mate (FIGURA 3). Os solos de origem sedimentar, como os de Fernandes Pinheiro, Mallet e São João do Triunfo, apresentaram alta disponibilidade de Al e Fe e baixos teores Mn e Cu. Mallet e São João do Triunfo apresentaram, ainda, baixos teores de K, Mg e Ba, o que não ocorreu para os solos de Fernandes Pinheiro. Os solos de origem basáltica de meia encosta como Cruz Machado, Seara, Cascavel, Barão do Cotegepe, apresentaram teores, de no mínimo, 60% a mais de macronutrientes como K e Mg, e de elementos traço e micronutrientes como Ba, Mn e Cu do que os demais solos analisados (FIGURA 1). Os solos oriundos de riodacitos não apresentaram tendências bem definidas, a exemplo dos solos de Ilópolis que apresentaram teores de elementos disponíveis similares aos solos basálticos, enquanto os solos de

Faxinal do Céu se aproximaram das características de solos sedimentares (FIGURA 1).

A influência da rocha de origem sobre os teores de elementos no tecido vegetal foi evidente apenas nos solos do grupo 1 (FIGURA 3). Dessa forma, não foi possível discriminar a rocha de origem a partir dos teores de elementos no tecido de mudas de erva-mate (acurácia de 89%) (FIGURA 6). Porém, algumas relações foram identificadas, como teores elevados de Al mais comuns em plantas cultivadas com solos sedimentares, enquanto altos teores de Fe e Zn no tecido foram em solos basálticos, e altos teores de Mn e Ca no tecido foram em solos riodacíticos (FIGURA 6).

FIGURA 6 - ANÁLISE DISCRIMINANTE DE ROCHAS DE ORIGEM (BASALTO, RIODACITO E SEDIMENTAR) DE ACORDO COM OS TEORES DE ELEMENTOS EM TECIDOS MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL.



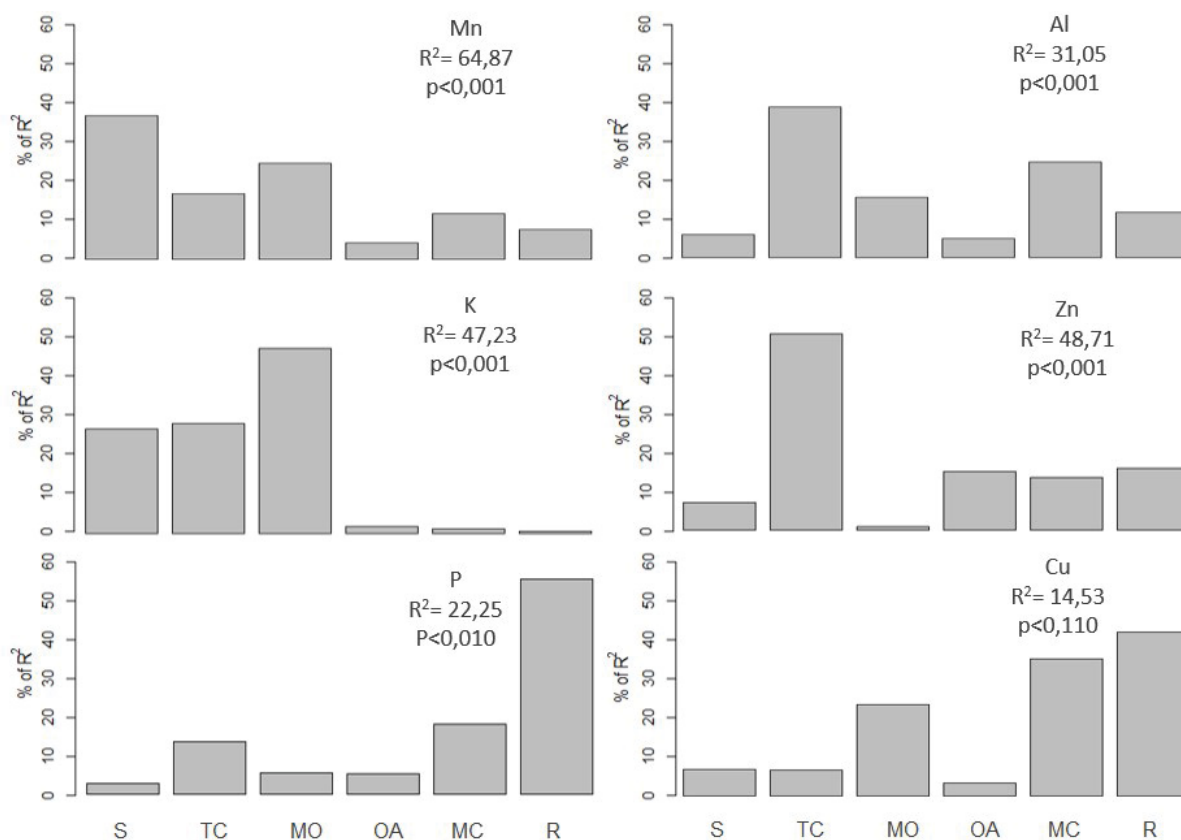
FONTE: O autor (2021).

O efeito da posição na paisagem sobre a disponibilidade de elementos no solo também refletiu nos teores de elementos nos tecidos vegetais, que apresentaram teores mais elevados de P e Ca em plantas cultivadas em solos de meia encosta, e de Al e Mn, em plantas cultivadas em solos de topo de catena (S5 em Apêndice 1).

#### 2.5.4 Relação das Frações de Elementos no Solo e a Configuração Elementar em mudas de erva-mate

Os teores de Mn, K e Zn nos tecidos sofreram maior influência das frações desses elementos no solo do que os demais analisados (FIGURA 7 e S14 em Apêndice 1). A fração orgânica de Mn e K influenciou os teores desses elementos nos tecidos da planta, juntamente com a fração solúvel e trocável. Os teores de Zn e Mg nos tecidos vegetais foram afetados, principalmente, pela fração trocável. Os teores de Al nos tecidos foram majoritariamente influenciados pelas frações trocáveis. Essa tendência pode ser confirmada com os teores elevados de Al disponível no solo e no tecido vegetal das plantas cultivadas em solos de Fernandes Pinheiro TC e ME, Mallet TC e ME e Cruz Machado TC.

FIGURA 7 - IMPORTÂNCIA RELATIVA DE CADA FRAÇÃO SOBRE A CAPACIDADE DAS REGRESSÕES MÚLTIPLAS PREDIZEREM OS RESULTADOS ( $R^2$ ) DOS TEORES DE ELEMENTOS (Mn, Al, K, Zn, P e Cu) NOS TECIDOS DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS NOS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ESPÉCIE, NO SUL DO BRASIL, CONFORME MÉTODO LINDERMAN, MERENDA E GOLD (LMG).



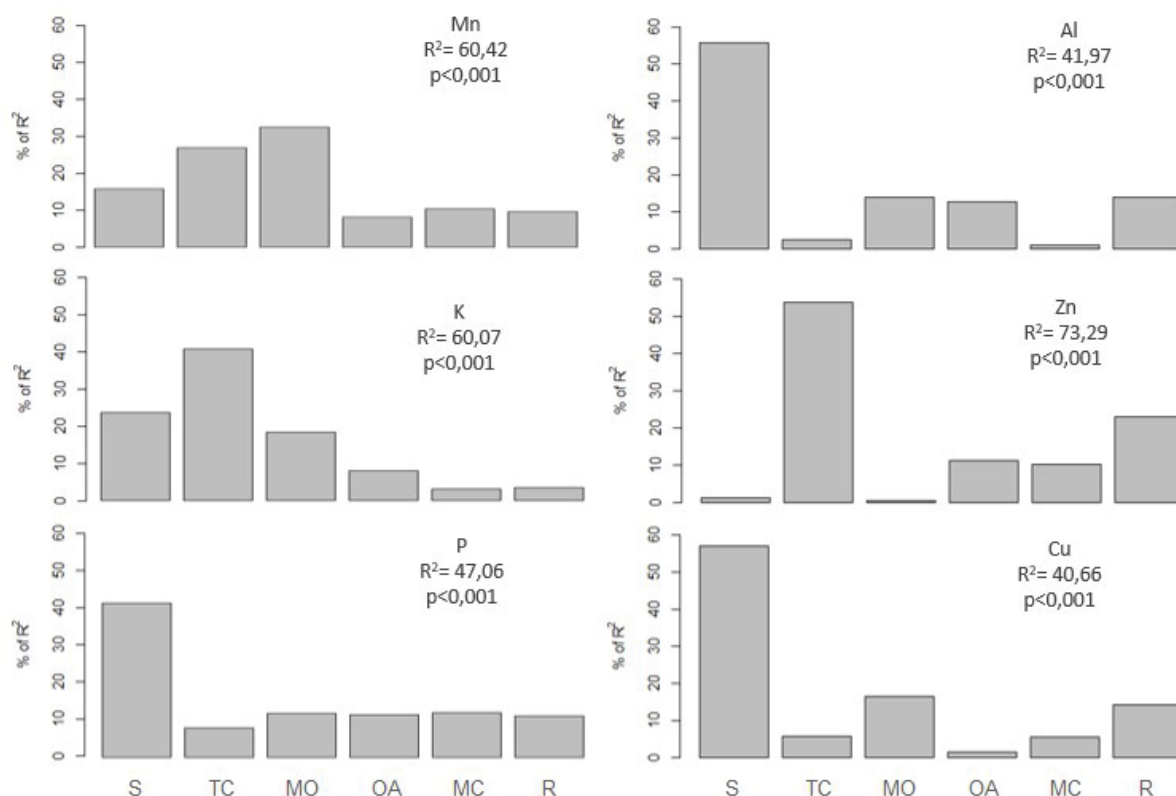
FONTE: O autor (2021).

S = Fração Solúvel; TC= Fração Trocável; MO= Fração na Matéria orgânica; OA= Fração nos óxidos amorfos; MC=Fração formada por óxidos de Al cristalino e minerais 1:1 e 2:1; R=Fração Residual. O  $R^2$  foi normalizado para 100% em todos os gráficos.



Os quocientes de determinações das regressões múltiplas ( $R^2$ ) que verificaram o efeito das diferentes frações dos elementos no solo sobre a quantidade de elemento no tecido foram maiores do que quando avaliado o efeito no teor de elementos nos tecidos (S7 e S15 em Apêndice 1). Nessas regressões, os coeficientes das frações orgânicas foram significativos e negativos para Al, Mn, Mg e Ba, e positivos para P e Zn. Os coeficientes das frações dos óxidos amorfos foram positivos para Fe e negativos para Mn, K, Zn e Ba.

FIGURA 8 - IMPORTÂNCIA RELATIVA DE CADA FRAÇÃO SOBRE A CAPACIDADE DAS REGRESSÕES MÚLTIPLAS PREDIZEREM OS RESULTADOS ( $R^2$ ) DAS QUANTIDADES DE ELEMENTOS ABSORVIDOS (Mn, Al, K, Zn, P e Cu) POR MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS NOS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ESPÉCIE, NO SUL DO BRASIL, CONFORME MÉTODO LINDERMAN, MERENDA E GOLD (LMG).



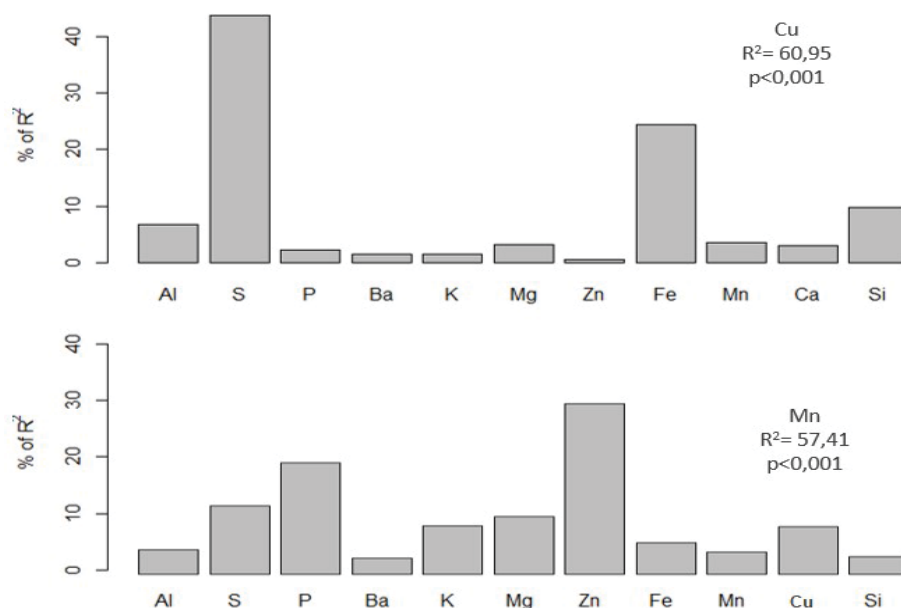
FONTE: O autor (2021).

S = Fração Solúvel; TC= Fração Trocável; MO= Fração na Matéria orgânica; OA= Fração nos óxidos amorfos; MC=Fração formada por óxidos de Al cristalino e minerais 1:1 e 2:1; R=Fração Residual. O  $R^2$  foi normalizado para 100% em todos os gráficos.

O teor de Mn nos tecidos foi influenciado positivamente pelos teores de Zn e negativamente pelos teores de P nos tecidos vegetais (FIGURA 9 e S16 em

Apêndice 1). E o teor de Cu nos tecidos se relacionou positivamente com os teores de S e Fe nos tecidos (FIGURA 9 e S16 em Apêndice 1).

FIGURA 9 - IMPORTÂNCIA RELATIVA DE CADA TEOR DE ELEMENTO (Al, S, P, Ba, K, Mg, Zn, Fe, Cu, Mn, Ca e Si) EM TECIDOS DE MUDAS DE ERVA-MATE SOBRE A CAPACIDADE DAS REGRESSÕES MÚLTIPLAS PREDIZEREM OS RESULTADOS ( $R^2$ ) DOS TEORES DE Cu E Mn EM MUDAS DE ERVA-MATE MATE CULTIVADA NOS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL, CONFORME MÉTODO LINDERMAN, MERENDA AND GOLD (LMG).



FONTE: O autor (2021).

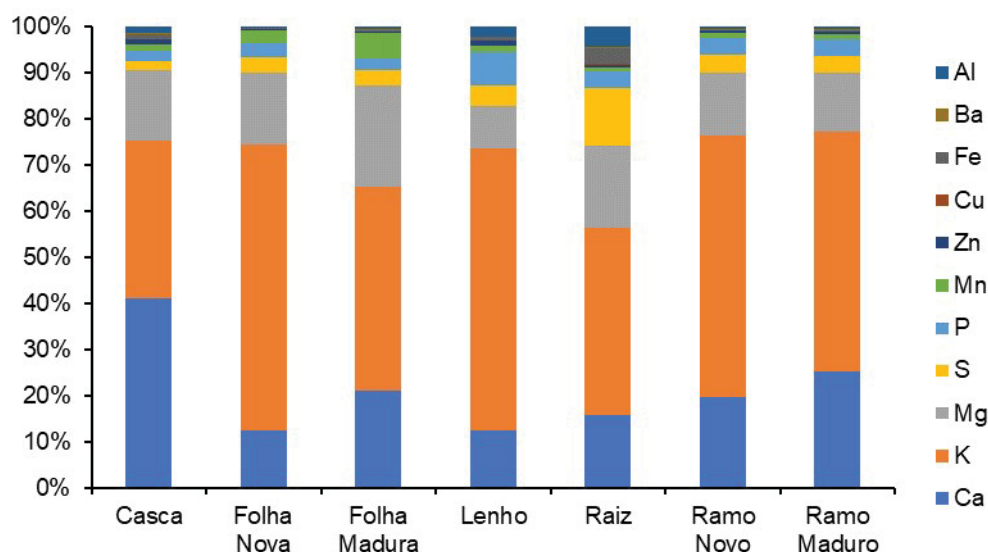
O  $R^2$  foi normalizado para 100% em todos os gráficos.

### 2.5.5 Relação da química do solo, dos teores de elementos nas frações de mudas de erva-mate e Fator de Translocação.

A ordem decrescente de teores de elementos nos tecidos vegetais, de forma geral foi:  $K > Ca > Mg > S > P > Mn > Al > Fe > Zn > Ba > Cu$ , sendo diferente para folhas maduras ( $K > Mg > Ca > Mn > S > P > Al > Fe > Zn > Ba > Cu$ ) e raízes ( $K > Mg > Ca > S > Al > P > Fe > Zn > Mn > Ba > Cu$ ) (FIGURA 10).



FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO PROPORCIONAL DE ELEMENTOS EM CADA FRAÇÃO VEGETAL DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ESPÉCIE, NO SUL DO BRASIL.



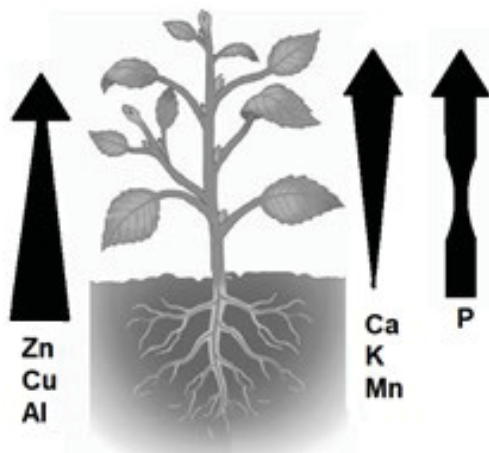
FONTE: O autor (2021).

As translocações de Mg, Zn, Al, Fe e Cu foram afetadas pelas características químicas dos solos (S17 em Apêndice 1).

Os elementos Zn, Cu, Al, S e Fe apresentaram fatores de translocações (FT) inferiores a 0,5, indicando que a maior parte desses elementos absorvidos permaneceu na raiz (FIGURA 10, S17 e S18 em Apêndice 1). Além da raiz, a casca também acumulou grande quantidade desses elementos. Os FTs para Ca ( $2,12 \pm 0,21$ ), K ( $1,52 \pm 0,10$ ), P ( $0,94 \pm 0,07$ ), S ( $0,41 \pm 0,03$ ), Ba ( $0,98 \pm 0,11$ ) e Mn ( $12,33 \pm 3,01$ ) não diferiram entre os solos, ao contrário dos demais elementos analisados (S17 em Apêndice 1).

Quanto mais ativo o órgão da planta maior foi o teor de macronutrientes (FIGURA 11). As folhas da erva-mate também obtiveram altos teores de Mn, micronutriente potencialmente tóxico em concentrações superiores à faixa de 200-3.500 mg kg<sup>-1</sup> variando de acordo com a espécie (KRÄMER, 2010).

FIGURA 11 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DOS FATORES DE TRANSLOCAÇÃO DE ELEMENTOS DO SISTEMA RADICULAR PARA PARTE AÉREA EM ERVA-MATE.



FONTE: O autor (2021).

A espessura das setas indica onde ocorre maior concentração do elemento na planta correspondente.

## 2.6 DISCUSSÃO

### 2.6.1 Efeito da rocha de origem e da posição na paisagem sobre a química do solo e a produção de matéria seca

Em grande parte, solos com similaridades em teores de nutrientes disponíveis, rocha de origem e posição na paisagem apresentaram produções de matéria seca distintas, decorrente da limitação de algum elemento, conforme determina a lei do mínimo de Liebig (FIGURA 2). No entanto, também foi observado que solos muito distintos quimicamente levaram a produções semelhantes. Um provável efeito de co-limitações de múltiplos recursos (HARPOLE et al., 2011) pode ter ocorrido, devido a interações entre os elementos no solo e na planta (VENTERINK, 2016; PITA-BARBOSA et al., 2019). Porém, a plasticidade adaptativa das plantas em lidar com a escassez de recursos explica a superação de algumas dessas limitações (LAMBERS et al., 2010) e os resultados em matéria seca distintos do que seriam esperados.

Plantas cultivadas com solos mais eutróficos, estão sujeitas a ter seu potencial produtivo limitado devido à escassez de algum elemento em específico, como foi o caso das plantas cultivadas nos solos Cascavel ME e Barão do Cotegipe ME, do grupo 1 (FIGURA 2). Por outro lado, solos com limitações em múltiplos

elementos conduzem a respostas produtivas mais dependentes de interações complexas entre as características químicas do solo e a capacidade adaptativa da planta, como aconteceu com os solos dos grupos 2 e 3 (FIGURA 2). Cascavel ME se diferenciou dos outros solos do grupo 1 - aqueles com teores mais elevados de nutrientes – provavelmente pelo baixo teor de Zn disponível (FIGURA 1), o que resultou em menor produção de matéria seca (S3 em Apêndice 1). ZHANG et al. (2017) verificaram em *Camellia sinensis* que a deficiência de Zn diminui o metabolismo de carboidratos, inibindo o crescimento e afetando a produção de matéria seca. E para BELLOTE e STURION (1985), os elementos mais limitantes à produção de matéria seca em erva-mate são em ordem decrescente: N, Ca, P, K, Mg, Zn, Cu e Fe. Barão do Cotegipe ME apresentou baixos teores de P, sendo provavelmente a principal causa da baixa produção de matéria seca de plantas cultivadas nesse solo, confirmada pela correlação positiva entre estes fatores (S4 em Apêndice 1), da mesma forma como foi determinado em CECONI et al. (2007), SANTIN et al. (2008, 2013, 2017) e BARBOSA et al. (2018). Porém, em BARBOSA et al. (2018), embora incrementos de P no solo levaram a maiores produtividades, os teores foliares de P não aumentaram.

Solos com teores disponíveis de P mais baixos do que Barão do Cotegipe ME, como foi o caso de Fernandes Pinheiro TC e Barão do Cotegipe TC, apresentaram produções de matéria seca iguais a de Cruz Machado ME (S14 em Apêndice 1), demonstrando um efeito de interação entre os elementos disponíveis no solo, bem como da atuação fisiológica da planta. A escassez de P disponível dispara na planta uma série de processos para induzir à mobilização das frações mais recalcitrantes, que vão desde associações simbióticas até exsudação de carboxilados que aumentam a disponibilidade de P diretamente via quelação e indiretamente via promoção do aumento da atividade microbiana na rizosfera, e secreção de fosfatases e fitases para mobilizar o P orgânico (SHEN et al., 2011; PISTOCCHI et al., 2018). A exemplo do que ocorre com plantas de eucalipto, que obtém parte do P necessário ao seu desenvolvimento de frações não disponíveis, segundo os métodos de extração tradicionais (FOLTRAN et al., 2019). Todas essas atividades requerem gasto de energia e fotoassimilados, que podem reduzir a capacidade de investimento da planta na sua própria matéria seca (CANARINI et al., 2019). As plantas podem exsudar até 40% de seus fotoassimilados, variando de

acordo com a espécie/variedade e com nível de estresse em que ela está submetida (BADRI e VIVANCO, 2009).

Os dados confirmam que a erva-mate é uma planta adaptada à condição de elevada acidez, uma vez que solos com baixo pH apresentaram produções de matéria seca similares a solos com pH mais moderado (FIGURA 2 e S3 em Apêndice 1), corroborando com REISSMANN et al. (1983), RADOMSKI et al. (1992), LOURENÇO et al. (1999), CARVALHO (2003), PANDOLFO et al. (2003), TOPPEL et al. (2018) e MOTTA et al. (2020). As plantas nativas de regiões com solos ácidos, normalmente, não são afetadas pela acidez e sim pela escassez de nutrientes (HARIDASAN, 2008). No entanto, pH baixo, na maioria dos casos, é acompanhado por baixa saturação de bases, altos teores de Al e baixa disponibilidade de P, pois são consequências naturais do processo de intemperismo avançado em solos tropicais (HARIDASAN, 2008; LAMBER et al., 2010), gerando uma condição de escassez de múltiplos recursos e impactando negativamente na produção de matéria seca.

#### 2.6.2 A configuração elementar em mudas de erva-mate

A configuração elementar vem sendo utilizada como indicador de procedência para muito produtos agroindustriais, apresentando altos índices de discriminação (MARCELO et al., 2014; QIAN et al., 2019; MOTTA et al., 2020; ZHANG et al., 2020). As características químicas dos solos regionais certamente têm um papel em moldar essa configuração, como observado nos dados desse trabalho (FIGURA 3), uma vez que a maior parte dos elementos químicos absorvidos pelas plantas são obtidos a partir do solo. Mas, contrariando TOPPEL et al. (2018), os resultados desse trabalho indicam que pouco se pode inferir sobre os teores de elementos em erva-mate, a partir dos teores de elementos disponíveis no solo. As correlações foram baixas (S7 em Apêndice 1) e um dos motivos para isso é dado pelo efeito de diluição ou concentração (FIGURA 3, S5 a S8 em Apêndice 1). Outro motivo se dá pela interação entre os elementos no solo e a fisiologia da planta que atua regulando os processos absorptivos. SANTIN et al. (2013) observaram que a maximização da produção de erva-mate com a aplicação de doses de P depende da disponibilidade adequada de N, K e Ca. Similar ao presente trabalho, em que a correlação entre os macronutrientes entre si no tecido vegetal foi maior do que dos

macronutrientes com os demais elementos no tecido. No entanto, TOPPEL et al. (2018) ao avaliarem plantas de erva-mate cultivadas em campos nativos sem uso de adubação observaram, assim como nesse estudo, correlações negativas entre teores de Ca e P em folhas de erva-mate. Isso pode ser explicado pelo efeito da translocação de nutrientes, sendo o Ca um elemento imóvel na planta, ele permanece nas folhas maduras, não sendo translocado para os tecidos novos como ocorre com o P (FIFE et al., 2008), fenômeno agravado pela escassez de P em todos os solos analisados.

O fato do teor de Mn nos tecidos ter sido influenciado pelo teor de Mn disponível no solo (S7 em Apêndice 1), e também pelos teores de Zn e P nos tecidos vegetais (FIGURA 9), assim como, o teor de Cu nos tecidos ter sido condicionado pelos dos teores de S e Fe nos tecidos (FIGURA 9), demonstra que as concentrações de elementos químicos nos tecidos variam como uma rede interdependente dentro de uma combinação de múltiplos elementos (PITA-BARBOSA et al., 2019).

Os esforços da planta para garantir quantidades mínimas de nutrientes para o seu desenvolvimento, através de exsudações e alterações nas quantidades de proteínas transportadoras, por exemplo, afetam a disponibilidade e a absorção de outros elementos, ocasionando um consumo de luxo de alguns elementos (FOLTRAN et al., 2019; WANG e LAMBERS, 2020), podendo levar a uma fraca correlação entre os teores de macronutrientes e de micronutrientes nos tecidos vegetais. Outro indício dos “efeitos colaterais” das reações da planta à baixa disponibilidade de macronutrientes foi a correlação negativa entre teores de Ba e K, e Mn e P (FIGURA 5), indicando que altos teores do elemento traço ocorreram, especialmente, quando houve menor disponibilidade do macronutriente. Resultados semelhantes a esse foram encontrados por TOPPEL et al. (2018). A liberação de ânions orgânicos pela rizosfera, estimulado pela escassez de P, aumenta a disponibilidade e a absorção de Mn (PANG et al., 2018; WANG e LAMBERS, 2020). Isso poderia explicar o fato de os teores de Mn em folhas maduras de plantas cultivadas em solos de Ilópolis ( $4,67 \pm 1,22 \text{ g kg}^{-1}$  de planta) terem sido os mais elevados, uma vez que esses solos não estão entre os que apresentaram os maiores teores de Mn, em todas as suas frações.

### 2.6.3 Relação da Rocha de Origem e Posição na Paisagem e a Configuração Elementar em mudas de erva-mate

Apesar da similaridade nos teores de elementos de plantas cultivadas em solos de mesma rocha de origem (FIGURA 3), estes não foram indicadores acurados do local de cultivo da erva-mate (FIGURA 6). Ao contrário do que apresentou MOTTA et al. (2020). Apesar da origem da rocha dar sinais sobre seu conteúdo mineralógico, pode-se encontrar grande variação nos tipos e quantidades de minerais de acordo com cada formação geológica, além da influência dos demais fatores de formação de solo (JACKSON, 2015). Isso fica evidenciado nos solos Ilópolis e Faxinal do Céu, ambos de origem riodacítica, mas com teores elementares muito distintos. O mesmo ocorre ao se comparar solos de Fernandes Pinheiro com os demais solos de origem sedimentar (FIGURA 1).

O efeito da posição na paisagem do solo sobre os teores de elementos em mudas de erva-mate foi significativo apenas para Ca, P, Mn e Al (S5 em Apêndice I). Plantas cultivadas em solos de meia encosta, menos susceptíveis ao processo de intemperismo, apresentaram teores mais elevados de Ca e P (LAMBERS et al., 2010), enquanto plantas cultivadas em solos de topo da catena, onde o processo de intemperismo se dá mais intensamente, com consequente lixiviação de bases e queda no pH, apresentaram teores de Al e Mn mais elevados. A disponibilidade de Al e Mn é diretamente relacionada ao baixo pH dos solos TC, mas a composição mineralógica, em geral, apresenta grande influência nas disponibilidades, como reportado por RABEL et al. (2018).

### 2.6.4 Relação das Frações de Elementos no Solo e a Configuração Elementar em mudas de erva-mate

A erva-mate, embora tenha passado por processos de melhoramento genético, ainda mantém características que conferem a ela grande rusticidade, dificultando a correlação entre teores de elementos disponíveis no solo com teores de elementos na planta. Espécies vegetais de ciclo longo frequentemente são capazes de extrair elementos do solo que não estão prontamente disponíveis (AMARAL et al., 2015; TOPPEL et al., 2018), essa capacidade é particularmente importante em espécies nativas de regiões tropicais, adaptadas a solos muito intemperizados e empobrecidos (HARIDASAN, 2008). Contudo, LI et al. (2018)

observaram correlação entre teores de elementos em *Camelia sinensis* (chá-verde) e teores de elementos nos solos onde essas plantas foram cultivadas.

A mobilização gradativa de elementos de frações mais recalcitrantes é um fator que dificulta a correlação de teores de elementos disponíveis no solo com teores ou quantidade de elementos na planta, o que pode explicar os resultados apresentados nas FIGURA 3 e FIGURA 6. Esse fenômeno foi verificado para *Eucalyptus grandis*, em que o incremento médio anual se correlacionou com a cinética de liberação de Ca, K e Mg, a partir de minerais primários do solo (AMARAL et al., 2015).

A dinâmica de mobilização é diferente para cada elemento, podendo ser estimulada por fatores bióticos (como exsudatos da planta ou ação de micro-organismos, por exemplo) (YUAN et al., 2017) ou fatores abióticos (como mudanças de pH, da condição redox, da composição da solução do solo ou da força iônica da solução do solo) (CAO et al., 2001; PÉDROT et al., 2010). Na FIGURA 8, observa-se que, apesar das frações lábeis (solúvel e trocável) serem os preditores de maior importância para a maioria dos elementos analisados no tecido vegetal, as demais frações não devem ser ignoradas. Essas frações têm potencial para atuar tanto como fonte quanto dreno de elementos, uma vez que a cinética de liberação de elementos é composta por processos de dissolução e re-adsorção (PENG et al., 2018). As regressões múltiplas, que avaliaram as relações entre quantidade de elementos nos tecidos e teores de elementos nas frações do solo, indicaram que a fração orgânica atuou como dreno de Al, Mn e Mg, e como fonte de P (S17 em Apêndice I). Embora a fração orgânica tenha capacidade de complexar Al (GRUBA e MULDER, 2015), ela também atua como fonte de Al, especialmente em solos mais intemperizados, devido à sua alta capacidade de retenção de cátions, mantendo o Al na fração disponível do solo, dificultando sua estabilização em frações mais recalcitrantes (RABEL et al., 2018). Da mesma forma, a fração dos óxidos amorfos atuou como fonte de Fe e dreno de Mn e Zn (S15 em Apêndice I). A formação de complexos de Zn e Mn com hidróxidos de Fe e Al é responsável por sequestrar esses elementos da fração disponível do solo (LÓPEZ-RAYO et al., 2014; PENG et al., 2018).

Os dados apontam que, embora influenciados pelos teores de elementos do solo no qual a erva-mate foi cultivada e indiretamente afetados pela rocha de origem e posição na paisagem do solo, os teores de elementos nas mudas de erva-mate



foram fortemente impactados pela fisiologia da planta, pela interação entre os elementos no solo e pela dinâmica de mobilização de elementos nas suas diversas frações. Desta forma, não foi possível correlacionar diretamente teor de elementos disponíveis no solo com teor de elementos no tecido vegetal, para a maioria dos elementos analisados.

#### 2.6.5 Relação da química do solo, dos teores de elementos nas frações de mudas de erva-mate e Fator de Translocação.

Os elementos acumulados nas folhas de erva-mate apresentaram valores mais elevados de K, Mg e Zn, e mais baixos para Mn, Al, Cu e Fe do que reportados por TOPPEL et al. (2018), e todos os teores foram mais elevados do que os encontrados por BASTOS et al. (2018). Isso provavelmente ocorreu em função do material de origem dos solos (rochas ígneas) como os de Seara, Barão do Coteipe, Cascavel e Ilópolis. As rochas ígneas possuem grande quantidade de minerais primários com alto potencial em fornecer nutrientes para as plantas, além disso, esses minerais também são muito ricos em elementos traço, ao contrário do que ocorre, no geral, com rochas sedimentares (MELO et al., 2016).

Os teores de elementos em folhas de erva-mate são afetados por diversos fatores além da disponibilidade de elementos no solo, como época de coleta, temperatura, pluviosidade, incidência luminosa, variedade, idade da planta, efeitos de diluição ou concentração devido às variações na produção na matéria seca. Por isso, comparações entre teores de elementos nas folhas devem ser feitos com ressalvas.

Os elementos Mg, Zn, Al, Fe e Cu tiveram seus FT alterados pelas características químicas dos solos e também foram os que apresentaram maior acúmulo na zona radicular, com exceção do Mg (FIGURA 7 e S3 em Apêndice 1).

A disponibilidade de Mg no meio altera os mecanismos da planta de absorção e translocação desse elemento (WANG et al., 2020b). O Mg é um macronutriente essencial cuja absorção e a translocação compete com outros elementos como o Ca, K e Mn. Os elevados teores de Mn em plantas cultivadas com solos de Ilópolis, independentemente da posição na paisagem, podem ter comprometido a absorção de Mg e afetado sua translocação.

A ação da planta em garantir os nutrientes necessários as atividades metabólicas nas folhas, órgão mais ativo da planta, pode fazer com que essa altere



seu metabolismo, e, em alguns casos, as características químicas da rizosfera, aumentando ou diminuindo a absorção de outros elementos, constituindo um efeito colateral (BAXTER et al., 2008; ZHAO et al., 2019; WANG e LAMBERS, 2020; WANG et al., 2020a). Por exemplo, apesar da folha ser o órgão mais ativo da planta, em caso de baixa disponibilidade de P, a planta tende a manter grande parte do P absorvido no sistema radicular (ABICHEQUER e BOHNEN, 1998), aumentando a capacidade da raiz crescer e fornecer energia para a absorção ativa de nutrientes (WANG et al., 2015). Todos os solos analisados apresentaram baixa disponibilidade de P, mantendo assim o FT médio abaixo de 1, não apresentando diferença entre os solos.

A deficiência de P leva à proliferação de raízes e ao aumento na absorção de Cd, mas com baixa translocação do Cd para a parte aérea (WANG et al., 2020a). A absorção e a translocação de outros íons metálicos, como o Zn, também estão sujeitas aos controles homeostáticos disparados pela deficiência de P, como a acidificação da rizosfera, que aumenta a absorção de íons metálicos, seguido de diminuição da translocação, a partir da inibição da expressão de genes de transportadores como HMA4, ATM3 e PCR2, por exemplo (KAJALA et al., 2019). Portanto, a translocação de íons dentro da planta está ligada aos fatores externos como disponibilidade de elementos, mas também fortemente ligados a controles homeostáticos da planta.

Outro aspecto é a interação entre os elementos na planta que pode modificar a translocação dos mesmos. Há registro, em arroz, que o S aumenta a translocação de Cu (SUN et al., 2017). Isso poderia explicar o fato de a translocação de Cu ter sido maior para solos de Faxinal do Céu e menor para solos de Fernandes Pinheiro, uma vez que solos de Faxinal do Céu apresentaram o dobro de S disponível do que os de Fernandes Pinheiro (S17 em Apêndice 1).

A erva-mate parece fazer uso do mecanismo de exclusão da parte aérea para Zn, Cu, Fe e Al. Esse mecanismo adaptativo para lidar com a presença de elementos potencialmente tóxicos concentra o excesso desses elemento nas raízes ou na casca da planta, a partir da complexação desses íons, restringindo, assim, a translocação dos mesmos ou através da diminuição no número de transportadores ativos na planta desses íons (JUÀREZ-SANTILLÁN et al., 2010). Para o Mn, a compartimentação na parte aérea parece ser o mecanismo mais provável. Essa

compartimentação, em geral, se dá em organelas pouco ativas, como tricomas e vacúolos, por exemplo (S14 em Apêndice 1) (MILLALEO et al., 2010).

## 2.7 CONCLUSÕES

A rocha de origem e a posição na paisagem influenciaram as características químicas do solo que, por sua vez, afetaram a produção de matéria seca em mudas de erva-mate. No entanto, solos muito distintos quimicamente apresentaram produção de matéria seca similares, devido à plasticidade fisiológica da planta em lidar com a escassez de recursos.

As configurações elementares das mudas de erva-mate foram afetadas pelos solos nos quais elas foram cultivadas. Apesar da influência da rocha de origem e do relevo na química do solo eles não foram indicadores acurados para teores de elementos no tecido vegetal. A cinética de mobilização de elementos das frações do solo dificultou a correlação dos teores de elementos do solo com teores de elementos na planta, uma vez ela variou para cada elemento e para cada solo.

As diferenças nas translocações de acordo com o solo também dificultaram a correlação entre teores de elementos no solo e em folhas e ramos, órgãos normalmente utilizados na comparação entre teores de elementos em produtos comerciais, uma vez que a raiz, uma fração da planta importante na resposta aos teores de elementos do solo, é excluída.

A partir dos dados do presente trabalho, rejeitamos a hipótese inicial de que em solos não antropizados, representativos da região de origem da erva-mate, a absorção de elementos químicos pela planta e a produção de matéria seca seriam subordinados aos teores de elementos disponíveis no solo, sendo um fator importante na indicação de procedência.

Verificamos que as características químicas do solo interferiram nos teores de elementos da erva-mate, mas que a fisiologia da planta adaptada a condições de escassez de nutrientes resultou em produção de matéria seca e teores de elementos na planta difíceis de serem preditos. Dessa forma, ainda que os teores de elementos da erva-mate possam distinguir sua região de origem, segundo alguns estudos relatam, os teores de elementos do solo não devem ser a principal causa da configuração elementar. Avançar nos conhecimentos de fisiologia da erva-mate, especialmente nos mecanismos genéticos que regulam o perfil elementar da planta (ionome), pode trazer grande avanço no entendimento da relação planta/solo para a

erva-mate. Outro fator importante a ser salientado é que a erva-mate é uma espécie perene, dessa forma ao avaliar plantas com apenas 12 meses estamos tirando uma fotografia de um momento fisiológico, avaliações com plantas em diferentes idades e estádios fisiológicos podem revelar outras interações que não foram contempladas por esse estudo.

## 2.8 REFERÊNCIAS

ABICHEQUER, A.D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **R. Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.21-26, 1998.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol. Z.**, v.22, n.6, p.711–728, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 01 mar. 2018.

AMARAL, F.H.C.; NETO, A.E.F.; CURI, N.; INDA, A.V.; ARAÚJO, E.F. Produtividade de *Eucalyptus grandis* e sua relação com a cinética de liberação de macronutrientes Productivity of *Eucalyptus grandis* and its relationship with the macronutrients release kinetics. **Sci. For.**, v.43, p.979-991, 2015.

ANDA, M. Cation imbalance and heavy metal content of seven Indonesian soils as affected by elemental compositions of parent rocks. **Geoderma**, v.189–190, p.388–396, 2012.

BADRI, D.V.; VIVANCO, J.M. Regulation and function of root exudates. **Plant Cell Environ.**, v.32, p.666–681, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.01926.x>. Acesso em: 15 nov. 2019.

BARAN, A.; GRUSZECKA-KOSOWSKA, A.; KOŁTON, A.; JASIEWICZ, C.; PIWOWAR, P. Content and health risk assessment of selected elements in the Yerba mate (*Ilex paraguariensis*, St. hillaire). **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v.24, p. 1092-1114, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10807039.2017.1406304>. Acesso em: 20 out. 2019.

BARBOSA, J.Z.; MOTTA, A.C.V.; CONSALTER, R.; POGGERE, G.; SANTIN, D.; WENDLING, I. Plant growth, nutrients and potentially toxic elements in leaves of

yerba mate clones in response to phosphorus in acid soils. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.90, p. 557-571, 2018.

BASTOS, M.C.; CHEROBIM, V.F.; REISSMANN, B.; KASEKER, J.F.; GAIAD, S. Yerba mate: nutrient levels and quality of the beverage depending on the harvest season. **Journal of food composition and analysis**, v.69, p.1-6, 2018.

BERTÉ, K.A.S. **Tecnologia da erva-mate solúvel**. 160 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/26312>. Acesso em: 16 fev. 2019.

BRACESCO, N.; SANCHEZ, A.G.; CONTRETAS, V.; MENINI, T.; GUGLIUCCI, A. Recent advances on *Ilex paraguariensis* research: Minireview. **Journal of Ethnopharmacology**, v.136, p.378-384, 2011.

BRAGANÇA, V.L.C.; MELNIKOV, P.; ZANONI, L.Z. Trace Elements in Different Brands of Yerba Mate Tea. **Biol Trace Elem Res**, v.144, p.1197–1204, 2011.

BRAXTER, I.R.; VITEK, O.; LAHNER, B.; MUTHUKUMAR, B.; BORGHI, M.; MORRISSEY, J.; GURINOT, M.L.; SALT, D.E. The leaf ionome as a multivariable system to detect a plant's physiological status. **PNAS**, v.105, p.12081-12086, 2008.

CANARINI, A.; MERCHANT, A.; RICHTER, A.; WANEK, W. Root exudation of primary metabolites: mechanisms and their roles in plant responses to environmental stimuli. **Frontiers in Plant Science**, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2019.00157>. Acesso em: 05 out. 2020.

CANIZA, D.A.A.; TURATTI, A.M.; FERNANDES, F.; DIAS, J.F.; SANTOS, C.E.L. Cheochemical markers of *Ilex paraguariensis* determined by PIXE. **Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B**, v.477, p.163–168, 2020.

CAO, X.; CHEN, Y.; WANG, X.; DENG, X. Effect of redox potential and pH value on the release of rare Earth elements from soil. **Chemosphere**, v.44, p.655-661, 2001.

CÁSSIA-SILVA, C.; CIANCIARUSO, M.V.; MARACAHIPES, L.; COLLEVATTI, R.G. When the same is not the same: phenotypic variation reveals different plant ecological strategies within species occurring in distinct Neotropical savanna habitats. **Plant Ecol**, v.218, p.1221-1231, 2017.

GARDI, C.; ANGELINI, M.; BARCELÓ, S.; COMERMA, J.; CRUZ GAISTARDO, C.; ENCINA ROJAS, A.; JONES, A.; KRASILNIKOV, P.; MENDONÇA- SANTOS, M.L.; MONTANARELLA, L.; MUNIZ UGARTE, O.; SCHAD, P.; VARA RODRÍGUEZ, M.I.; VARGAS, R.; RAVINA DA SILVA, M. (eds), 2015. **Atlas de solos de América Latina e do Caribe**, Comissão Europeia – Serviço das Publicações da União Europeia, L-2995 Luxembourg, 176 pp.

CROGE, C.P.; CUQUEL, F.L.; PINTRO, P.T.M. Yerba mate: cultivation systems, processing and chemical composition. A review. **Scientia Agricola**, 78: e20190259, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0259>. Acesso em: 02 fev. 2021.

FIFE, D.N.; NAMBIAR, E.K.S.; SAUR, E. Retranslocation of foliar nutrients in evergreen tree species planted in a Mediterranean environment. **Tree Physiology**, v.28, p.187-196, 2008.

FOLTRAN, E.C.; ROCHA, J.H.T.; BAZANI, J.H.; GONÇALVES, J.L.M.; RODRIGUES, M.; PAVINATO, P.; VALDUGA, G.R.; ERRO, J.; GARCIA-MINA, J.M. Phosphorus pool responses under different P inorganic fertilizers for a eucalyptus plantation in a loamy Oxisol. **Forest Ecology and Management**, v.435, p.170-179, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.053>. Acesso em: 25 abr. 2020.

GERHARDT, M. Colonos ervateiros: História ambiental e imigração no Rio Grande do Sul. **Revista Esboços**, v.18, p.73-95, 2011.

GERKE, I.B.B.; HARMERSKI, F.; SCHEEFER, A.P.; SILVA, V.R. Solid-liquid extraction of bioactive compounds from yerba mate (*Ilex paraguariensis*) leaves: Experimental study, kinetics and modeling. **Journal of Food Process Engineering**, v.41, e12892, 2018.

GIULIAN, R.; SANTOS, C.E.I.; SHUBEITA, S.M.; SILVA, L.M.; YONEAMA, M.L.; DIAS, J.F. The study of the influence of industrial processing on the elemental composition of mate tealeaves (*Ilex paraguariensis*) using the PIXE technique. **Food Science and Technology**, v.42, p.74–80, 2009.

GRUBA, P.; MULDER, J. Tree species affect cation Exchange capacity (CEC) and cation binding properties of organic matter in acid forest soils. **Science of the total environment**, v.511, p.655-662, 2015.

HARIDASAN, M. Nutritional adaptations of native plants of the cerrado biome in acid soils. **Braz. J. Plant Physiol.**, v.20, p.183-195, 2008.

HARPOLE, W.S.; NGAI, J.T.; CLELAND, E.E.; SEABLOOM, E.W.; BORER, E.T.; BRACKEN, M.E.S.; ELSEER, J.J.; GRUNER, D.S.; HILLEBRAND, H.; SHURIN, J.B.; SMITH, J. Nutrient co-limitation of primary producer communities. **Ecology Letters**, v.14, p.852-862, 2011.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

JACKSON, T.A. Weathering, secondary mineral genesis, and soil formation caused by lichens and mosses growing on granitic gneiss in a boreal forest environment. **Geoderma**, v.251–252, p.78-91, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.012>. Acesso em: 10 mar. 2020.

JACQUES, R.A.; ARRUDA, E.J.; OLIVEIRA, L.C.S.; OLIVEIRA, A.P.; DARIVA, C.; OLIVEIRA, J.V.; CARAMA, E.B. Influence of Agronomic Variables on the Macronutrient and Micronutrient Contents and Thermal Behavior of Mate Tea Leaves (*Ilex paraguariensis*). **J. Agric. Food Chem.**, v.55, p. 7510-7516, 2007.

KAJALA, K.; WALKER, K.L.; MITCHELL, G.S.; KRÄMER, U.; CHERRY, S.R. Real-time whole-plant dynamics of heavy metal transport in *Arabidopsis halleri* and *Arabidopsis thaliana* by gamma-ray imaging. **Plant Direct**, v.3, n.4, e00131, 2019.

KATERINOPOULOU, K.; KONTOGEORGOS, A.S.; CONSTANTINOS, P.; ANGELOS, L.A. Geographical Origin Authentication of Agri-Food Products: A Review. **Foods**, v.9, p. 489, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/foods9040489>. Acesso em: 19 dez. 2020.

KRÄMER, U. Metal hyperaccumulation in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 61, p.517-534, 2010.

KUMMER, L.; MELO, V.F.; BARROS, Y.J.; AZEVEDO, J.C.R. Extrações sequenciais de chumbo e zinco em solos de área de mineração e metalurgia de metais pesados. **Rev. Bras. Ciênc. Solo.**, v.35, p.2005-2018, 2011.

LAMBERS, H.; BRUNDRETT, M.C.; RAVE, J.A.; HOPPER, S.D. Plant mineral nutrition in ancient landscapes: high plant species diversity on infertile soils is linked to functional diversity for nutritional strategies. **Plant Soil**, v.348, p.7-27, 2011.

LI, L.; WEN, B.; ZHANG, X.; ZHAO, Y.; DUAN, Y.; SONG, X.; REN, S.; WANG, Y.; FRANG, W.; ZHU, X. Geographical origin traceability of tea based on multi-element spatial distribution and the relationship with soil in district scale. **Food Control**, v.90, p.18e28, 2018.

LIMA, J.P.; FARAH, A.; KING, B.; PAULIS, T.; MARTIN, P.R. Distriution of Major Chlorogenic Acids and Related Compounds in Brazilian Green and Toasted *Ilex paraguariensis* (Maté) Leaves. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.64, p.2361-2370, 2016.

LÓPEZ-RAYO, S.; LUCENA, S.; LUCENA, J.J. Chemical properties and reactivity of manganese chelates and complexes in solution and soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.177, p.189-198, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.201300091>. Acesso em: 25 dez. 2018.

MAACK, R. 2012. **Geografia física do Estado do Paraná**. 4 ed. Ponta Grossa, Editora UEPG.

MAGRI, E.; GUGELMIN, E.K.; GRABARSKI, F.A.P.; BARBOSA, J.Z.; AULER, A.C.; WENDLING, I.; PRIORF, A.S.; VALDUGA, A.T.; MOTTA, C.V. Manganese hyperaccumulation capacity of *Ilex paraguariensis* A. St. Hil. and occurrence of interveinal chlorosis induced by transient toxicity. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.203, 111010, 2020.

MARCELO, M.C.A.; MARTINS, C.A.; POZEBON, D.; DRESSLER, V.L.; FERRÃO, M.F. Classification of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) according to the country of origin based on element concentrations. **Microchemical Journal**, v.117, p.164–171, 2014.

MÁRQUEZ, V.; MARTÍNEZ, N.; GERRA, M.; FARIÑA, L.; BOIDO, E.; DELLACASSA, E. Characterization of aroma-impact compounds in yerba mate (*Ilex paraguariensis*) using GC-olfactometry and GC-MS. **Food Research International**, v.53, p.808-815, 2013.

MELO, V.F.; CASTILHOS, R.M.V.; PINTO, L.F.S. (2016) Reserva mineral do solo. In: Melo VF and Alleoni LR (ed) **Química e mineralogia do solo**, 1rd, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p.252-332

MILANI, R.F.; SILVESTRE, L.K.; MORGANO, M.A.; CADORE, S. Investigation of twelve trace elements in herbal tea commercialized in Brazil. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v.52, p.111–117, 2019.



MILLALEO, R.; REYES-DIAZ, M.; IVANOV, A.G.; MORA, M.L.; ALBERDI, M. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance. **Journal of soil science and plant nutrition**, v.10, p. 470-481, 2010. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>. Acesso em: 15 agost. 2019

MOTTA, A.C.V.; BARBOSA, J.Z.; MAGRI, E.; PEREIRA, G.Q.; SANTIN, D.; PRIOR, S.A.; CONSALTER, R.; YOUNG, S.D.; BROADLEY, M.R.; BENEDETTI, E.L. Elemental composition of yerba mate (*Ilex paraguariensis* A.St.-Hil.) under low input systems of southern Brazil. **Science of the Total Environment**, v.736, 139637, 2020.

NI, K.; WANG, J.; ZHANG, Q.; YI, X.; MA, L.; SHI, Y.; RUAN, J. Multi-element composition and isotopic signatures for the geographical origin discrimination of green tea in China: A case study of Xihu Longjing. **Journal of Food Composition and Analysis**, v.67, p.104–109, 2018.

OLIVA, E.V.; REISSANN, C.B.; GAIAD, S.; OLIVEIRA, E.B.; STURION, J.A. Composição nutricional de procedência e progenies de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) cultivadas em Latossolo Vermelho Distrófico. **Ciência Florestal**, v.24, p.793-805, 2014.

OLIVARI, I.; PAZ, S.; GUTIÉRREZ, A.J.; GONZÁLEZ-WELLER, D.; HARDISSON, A.; SAGRATINI, G.; RUBIO, C. Macroelement, trace element, and toxic metal levels in leaves and infusions of yerba mate (*Ilex paraguariensis*). **Environmental Science and Pollution Research**, v.27, p.21341–21352, 2020.

OLIVEIRA, Y.M.M.; ROTTA, E. Área de distribuição natural de erva mate. In: SEMINÁRIO SOBRE ATUALIDADES E PERSPECTIVAS FLORESTAIS: SILVICULTURA DA ERVA-MATE, 10., 1983, Curitiba. Anais. Curitiba: URPFCs, 1983. p. 17-35. (**EMBRAPA-URPFCS. Documentos, 25**).

PÉDROT, M.; DIA, A.; DAVRANCHE, M. Dynamic structure of humic substances: rare earth elements as a fingerprint. **J Colloid Interface Sci.**, v.345, n.2, p.206-13, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2010.01.069>. Acesso em: 21 de jan. 2019.

PENG, L.; SHI, Z.; WANG, P.; LI, Z.; DANG, Z.; SPARKS, D.L. A novel multi-reaction model for kinetics of Zn release from soils: Roles of soil binding sites. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.514, p.146-155, 2018.



PITA-BARABOSA, A.; RICACHENEVSKY, F.K.; FLIS, P.M. One “OMICS” to integrate them all: ionomics as a result of plant genetics, physiology and evolution. **Theor. Exp. Plant Physiol.**, v.31, p.71–89, 2019.

POZEBON, D.; DRESSLERB, V.L.; MARCELO, M.C.A.; OLIVEIRA, T.C.; FERRÃO, M.F. Toxic and nutrient elements in yerba mate (*Ilex paraguariensis*). **Food Additives & Contaminants: Part B**, v.8, p.215–220, 2015.

R CORE TEAM (2017) **R: a language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.

RABEL, D.O.; MOTTA, A.C.V.; BARBORA, J.Z.; MELLO, V.F.; PRIOR, A.S. Depth distribution of exchangeable aluminum in acid soils: A study from subtropical Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.40, e39320, 2018.

ROSSA, U. B. **Produtividade e compostos foliares de erva-mate sob efeitos de luminosidade e fertilização**. UFPR, 2013, 208f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/32260>. Acesso em: 20 abr. 2019.

SAIDELLES, F.L.; REINERT, D.J.; SALET, R.L. Initial growth of “Erva-mate” (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) seedlings in three soil types in central region of Rio Grande do Sul State. **Ciência Florestal**, v.13, p.17-25, 2003.

SANTIN, D.S.; BENEDETTI, E.L.; BARROS, N.F.; ALMEIDA, I.C.; LEAL, G.P.; FONTES, L.; NEVES, J.C.L.; WENDLING, I.; REISSMANN, C.B. Effect of potassium fertilization on yield and nutrition of yerba mate (*Ilex paraguariensis*). **R. Bras. Ci. Solo**, 38:1469-1477, 2014.

SANTIN, D.S.; BENEDETTI, E.L.; BARROS, N.F.; ALMEIDA, I.C.; SIMIQUELI, G.F.; NEVES, J.C.L.; WENDLING, I.; REISSMANN, C.B. Nitrogen fertilization and harvesting intervals affect yerba mate productivity and the nitrogen and carbon of **Soil. Ci. Fl.**, v.29, p.1199-1214, 2019.

SANTIN, D.S.; BENEDETTI, E.L.; BARROS, N.F.; FONTES, L.L.; ALMEIDA, I.C.; NEVES, J.C.L.; WENDLING, I. Manejo de colheita e adubação fosfatada na cultura da erva-mate (*Ilex paraguariensis*) em fase de produção. **Ciência Florestal**, v.27, p.783-797, 2017.

SANTIN, D.S.; BENEDETTI, E.L.; BASTOS, M.C.; KASEKER, J.F.; REISSMANN, C.B.; BRONDANI, G.E.; BARROS, N.F. Growth and nutritional composition of erva-mate as affected by nitrogen, phosphate and potassium fertilization. **Ciência Florestal**, v.23, p.363-375, 2013.

SANTIN, D.S.; BENEDETTI, E.L.; BASTOS, M.C.; KASEKER, J.F.; REISSMANN, C.B.; BRONDANI, G.E.; BARROS, N.F. Crescimento e nutrição de erva-mate influenciados pela adubação nitrogenada, fosfatada e potássica. **Ciência Florestal**, v.23, p.363-375, 2013.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, W.; ZHANG, F. Phosphorus dynamics: From soil to plant. **Plant Physiology**, v.156, p.997-1005, 2011.

SUN, L.; YANG, J.; FANG, H.; XU, C.; PENG, C.; HUANG, H.; LU, L.; DUAN, D.; ZHANG, X.; SHI, J. Mechanism study of sulfur fertilization mediating copper translocation and biotransformation in rice (*Oryza sativa* L.). **Environmental Pollution**, v.226, p.426-434, 2017.

BELLOTE, A. F.; STURION, J. A. (1985) **Deficiências minerais em erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.): resultados preliminares**. In: SEMINÁRIO SOBRE ATUALIDADES E PERSPECTIVAS FLORESTAIS, 10., 1983, Curitiba. Silvicultura da erva-mate. Curitiba, 1985. p. 124-128.

TATSCH, F.R.P.; GONÇALVES, V.C.; MEURER, E.J. Alumínio total e solúvel em amostras de erva-mate comercializadas no Rio Grande do Sul. **Scientia Agraria**, v.11, p.83–86, 2010.

TOMASI, J. C. **Bioactive compounds of yerba mate according to genotype, nitrogen fertigation and drying methods and acceptance of mate tea by consumers**. UFPR, 2020, 142f. Tese (Doutorado em Agronomia). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná, 2020. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/68949>. Acesso em: 2 fev. 2021.

TOPPEL, F.V.; JUNIOR, A.M.; MOTTA, A.C.; FRIGO, C.; MAGRI, E.; BARBOSA, J.Z. Soil chemical attributes and their influence on elemental composition of yerba mate leaves. **Floresta**, v.48, p.425-434, 2018.

VALDUGA, A.T.; GONÇALVES, I.L.; MAGRI, E. Analysis of the Presence of Toxic Metals in Yerba Mate Samples: a Case Study from South Brazil. **Water Air Soil Pollut**, v.230, 153, 2019.

VENTERINK, O. H. Productivity increase upon supply of multiple nutrients in fertilization experiments; co-limitation or chemical facilitation? **Plant and Soil**, v.408, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-016-3055-2>. Acesso em: 20 dez. 2018.

XIAO-JUAN, B.; LI-JUAN, L.; CHUN-HUA, Z.; YING, G.; WANG-DA, C. Effect of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Pretreatment on Cd Tolerance of Different Rice Cultivars. **Rice Science**, v.18, n.1, p.29–35, 2011.

WANG, H.; CHEN, W.; SINUMVAYABO, N.; LI, Y.; HAN, Z.; TIAN, J.; MA, Q.; PAN, Z.; GENG, Z.; YANG, S.; KANG, M.; RAHMAN, S.U.; YANG, G.; ZHANG, Y. Phosphorus deficiency induces root proliferation and Cd absorption but inhibits Cd tolerance and Cd translocation in roots of *Populus x euramericana*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.204, 111148, 2020a.

WANG, Y.; LAMBERS, H. Root-released organic anions in response to low phosphorus availability: recente progress, challenges and future perspectives. **Plant Soil**, v.447, p.135-156, 2020.

WANG, Y.; WU, B.; BERNS, A.E.; XING, Y.; KUHN, A.J.; AMELUNG, W. Magnesium isotope fractionation reflects plant response to magnesium deficiency in magnesium uptake and allocation: a greenhouse study with wheat. **Plant Soil**, v.455, p. 93–105, 2020b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-020-04604-2>. Acesso em: 13 dez. 2020.

WANG, Z.A.; LI, Q.; GE, X.Y.; YANG, C.L.; LUO, X.L.; ZHANG, A.H.; XIAO, J.L.; TIAN, Y.C.; XIA, G.X.; CHEN, X.Y.; LI, F.G.; WU, J.H. The mitochondrial malate dehydrogenase 1 gene GhmMDH1 is involved in plant and root growth under phosphorus deficiency conditions in cotton. **Scientific Reports**, v.5,10343, 2015.

WENDLING, I.; STURION, J.A.; REIS, C.A.F.; STUEPP, C.A.; PEÑA, M.L. Inderect and expedite assessment of *Ilex paraguariensis* comercial yield. **Cerne**, v.22, p.241-248, 2016.

WESTPHALEN, D.J.; ANGELO, A.C.; ROSSA, U.B.; BOGNOLA, I.A.; MARTINS, C.E.N. Impact of different silvicultural techniques on the productive efficiency of *Ilex paraguariensis* A.St. Hill. **Agroforest Syst**, v.94, p.791-798, 2020.

YUAN, D.G.; DENG, Y.G.; PU, G.L.; HE, G.; ZHANG, J.S.; WENG, Q.; WANG, C.Q. Release kinetics of Si, Al, Fe, and Mn from Acid Soils in the presence of EGCG. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, p.1532-2416, 2017.

ZHANG, Y.; WANG, Y.; DING, Z.; WANG, H.; SONG, L.; JIA, S.; MA, D. Zinc stress affects ionome and metabolome in tea plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.111, p. 318-328, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.12.014>. Acesso em: 10 out. 2019.

ZHANG, J.; YANG, R.; LI, Y.C.; WEN, X.; PENG, Y.; NI, X. Use of mineral multi-elemental analysis to authenticate geographical origin of different cultivars of tea in Guizhou, China. **J. Sci. Food Agric.**, v.100, p.3046-3055, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.10335>. Acesso em: 30 dez. 2020.

### 3 CAPÍTULO II: RELAÇÃO ENTRE TEORES DE ELEMENTOS DISPONÍVEIS NO SOLO E TEORES DE COMPOSTOS SECUNDÁRIOS EM FOLHAS DE ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis* A. ST.-HIL)

#### 3.1 RESUMO

A ampliação na oferta de produtos derivados da erva-mate impulsiona novos mercados para os quais mais importante que a produtividade em termos de matéria seca é a produção de compostos bioativos. Saber quais os principais fatores que afetam a produção de compostos secundários bioativos em erva-mate permitirá melhor manejo dos ervais para garantir acesso a mercados diferenciados e por consequência obter melhor retorno financeiro da produção. Para verificar o efeito da química do solo sobre os teores de compostos secundários bioativos, especialmente a cafeína e ácido cafeoilquínico, em mudas de erva-mate, amostras de solos foram coletadas de nove sítios, com rochas de origem distintas, em duas posições na paisagem, totalizando 18 tratamentos. Os solos foram acondicionados em vasos, em quatro repetições, que receberam as mudas do clone BR5-BRD Yary e mantidas em condição de sub-bosque, durante 12 meses. Após esse período, as folhas maduras foram coletadas, lavadas, secas e finamente trituradas para obtenção do peso de matéria seca, do teor de elementos, e de cafeína (1,3,7 - trimetilxantina) e ácidos monocafeoilquínicos (ácido 3 – cafeoilquínico, ácido 4 – cafeoilquínico, ácido 5 – cafeoilquínico) por cromatografia líquida. O elemento cuja disponibilidade no solo apresentou maior correlação com teores de cafeína e ácidos monocafeoilquínicos totais foi o Mg, com  $r$  de 0,41 e 0,27, respectivamente. O teor foliar de P apresentou correlação fraca positiva com teor de cafeína, com  $r = 0,40$ , e negativa com Al, com  $r = -0,28$ , já os teores de ácidos monocafeoilquínicos totais apresentaram correlações desprezíveis com teores foliares elementares, sendo a maior com Zn ( $r = 0,21$ ). Apesar do teor de cafeína ter sido afetado pelas diferenças químicas no solo, a análise dos dados demonstrou que, mesmo isolando o fator solo, não foi possível identificar relações entre disponibilidade de elementos químicos no solo e a produção dos compostos secundários, especialmente dos ácidos cafeoilquínicos e cafeína.

Palavras-chave: Ácidos monocafeoilquínicos. Cafeína. Compostos fenólicos. Metilxantinas. Química do solo.

#### 3.2 ABSTRACT

The increase in the offer of products derived from yerba mate stimulates new markets for which more important than productivity in terms of dry matter is the production of bioactive compounds. Knowing what are the main factors that affect the production of bioactive secondary compounds in yerba mate will allow better management of the herbs to guarantee access to differentiated markets and consequently obtain better financial return on production. To verify the effect of soil chemistry on the contents of secondary bioactive compounds, especially caffeine and caffeoylquinic acid, in seedlings of yerba mate, soil samples were collected from nine sites, with different origin rocks, in two positions in the landscape, totalling 18 treatments. The soils were placed in pots, in four replications, which received the BR5-BRD Yary seedlings and kept in understory condition for 12 months. After that

period, the mature leaves were collected, washed, dried and finely crushed to obtain the dry matter weight, the element content, and the caffeine (1,3,7 - trimethylxanthine) and monocatecholquinic acids (3 - caffeoylquinic acid, 4 - caffeoylquinic acid, 5 - caffeoylquinic acid) by liquid chromatography. The element whose availability in the soil showed the highest correlation with levels of caffeine and total monocatecholquinoline acids was Mg, with  $r$  of 0.41 and 0.27, respectively. The foliar content of P showed a weak positive correlation with caffeine content, with  $r = 0.40$ , and negative with Al, with  $r = -0.28$ , whereas the levels of total monocatecholquinic acids showed negligible correlations with elementary leaf contents, being the highest observed with Zn ( $r = 0.21$ ). Although the caffeine content was affected by the chemical differences in the soil, the analysis of the data showed that, even isolating the soil factor, it was not possible to identify relationships between availability of chemical elements in the soil and the production of secondary compounds, especially caffeoylquinic acids and caffeine.

Keywords: Mono-caffeoylquinic acids. Caffeine. Phenolic compounds. Methylxanthines. Soil chemistry.

### 3.3 INTRODUÇÃO

As plantas produzem uma série de compostos orgânicos que não estão ligados diretamente ao seu desenvolvimento, chamados de compostos ou metabólitos secundários (ISAH, 2019). As condições ambientais afetam a produção de compostos secundários, uma vez que esses compostos, além das funções de defesa, transporte e comunicação interna (THIRUMURUGAN et al., 2018), são uma interface química entre as plantas e o ambiente (SCHUBERT et al., 2006; GOBBONETO E LOPES, 2007).

*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil, popularmente conhecida como erva-mate, é uma espécie vegetal que produz, naturalmente, um grande número de compostos secundários, sendo os mais importantes as metilxantinas, como a cafeína e teobromina, os compostos fenólicos, como os ácidos clorogênicos (ACG) e taninos, flavonoides, como a rutina, quercetina e glicosídeos de quercetina e saponinas (VIEIRA et al, 2011; MURAKAMI et al., 2013). Entre os principais benefícios à saúde proporcionados pelo consumo da erva-mate pode-se citar a prevenção de diabetes, da obesidade, de doenças hepáticas, de alguns tipos de câncer e também possui efeitos neuro-protetivos (LIU et al., 2020; LUTOMSKI et al., 2020; SARRIA et al., 2020).

Ao longo da história de manejo e produção comercial da erva-mate, a principal meta agrônômica foi o aumento de produtividade de matéria seca de folhas

e ramos novos, com pouca atenção para a qualidade do material (LOURENÇO et al., 1997; WENDLING et al., 2016). Esse cenário vem mudando nos últimos anos, com os avanços nas pesquisas da área farmacológica e com a diversificação dos subprodutos da erva-mate, uma vez que as formas de consumo tradicionais na forma de infusão (tereré e chimarrão) possuem um mercado fiel, mas estagnado (CROGE et al., 2021).

Desde 1960, ocorreu um aumento de publicações em todo o mundo tratando sobre os benefícios dos compostos fenólicos à saúde humana, em especial o ACG, sendo mais da metade delas na última década, como foi verificado por KARPINSKA et al. (2017). Considerando o forte indicativo do interesse crescente por alimentos funcionais e terapias alternativas, que vem ocorrendo globalmente, a erva-mate tem potencial para ganhar um espaço significativo no mercado mundial, investindo em qualidade de compostos bioativos (LIMA et al., 2016). Entre os novos produtos oriundos da erva-mate que vêm ganhando mercado estão o chá mate solúvel, cervejas, doces e cremes, que dependem do rendimento industrial, e estão ligados ao teor de sólidos solúveis e de bioativos presentes nos tecidos vegetais (BERTÉ, 2011; MÁRQUEZ et al., 2013; GERKE et al., 2018). A expansão do mercado, bem como aumento de valor agregado para a erva-mate, demanda aumento de qualidade de produto, altos teores de compostos secundários, padronização e classificação da matéria-prima. A classificação de ervais a partir de origens geográficas com potenciais para produtos distintos - alimentício ou farmacológico, por exemplo – também aumenta a valorização da produção regional (ZIELINSKI et al., 2020).

Intensidade de luz (sombreado ou a pleno sol), adubação, variedade, época e frequência de colheita e condições climáticas são fontes conhecidas de variação de produção da erva-mate (COELHO et al., 2007; DARTORA et al., 2011; MÁRQUEZ et al., 2013; BORGES et al., 2019). Porém, identificar fatores que afetam a produção de compostos secundários na erva-mate contribuiu para o direcionamento de práticas agrônômicas que resultará em um produto voltado a mercados específicos, bem como a classificação e a padronização desses produtos. Um fator ainda pouco estudado, isoladamente, é a influência do solo sobre a produção dos compostos secundários, uma vez que outros fatores ambientais e genéticos estão sempre presentes dificultando a análise independente.



A erva-mate é encontrada em uma extensão relativamente grande do sul do continente americano, cerca de 540.000 km<sup>2</sup>, dos quais 450.000 km<sup>2</sup> estão situados no Brasil (CARVALHO, 2003). Nessa área, há uma variação de formações de solo, com origens e níveis de intemperismos distintos, possuindo desde áreas com alta até baixíssima fertilidade natural. Os estudos realizados até o momento apresentaram resultados contraditórios ou inconclusivos ao relacionar disponibilidade de nutrientes com produção de compostos secundários (ZAMPIER, 2001; SANTIN, 2008; ROSSA et al., 2017).

Diante desses desafios técnicos e científicos, o presente trabalho teve o objetivo de isolar o fator solo para verificar a relação entre disponibilidade de elementos químicos no solo e a produção dos compostos secundários, especialmente dos ácidos cafeoilquínicos e cafeína.

### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.4.1 Locais de Estudo e Coleta de Solo

O estudo foi desenvolvido a partir do cultivo de mudas clonais de erva-mate em solos oriundos de duas posições na paisagem de regiões de ocorrência natural da espécie. Os locais de coleta de solo foram entre as latitudes 21° a 30°S e longitudes 48°a 56°W (ROSSA, 2013), inseridos dentro do domínio do bioma Mata Atlântica, especialmente da fitofisionomia florestal caracterizada como Floresta Ombrófila Mista (FOM), popularmente conhecida como Floresta ou Mata com Araucária (OLIVEIRA E ROTTA, 1983; IBGE, 2012).

As coletas foram feitas em 9 sítios com materiais de origem variados, como basalto, riodacito, argilito, arenito e folhelho, características químicas de solo distintas, em áreas de floresta secundária nativa que sofrem atividade extrativista de erva-mate com ausência de práticas de correções de solo ou adubações (TABELA 1).

Em cada sítio, foi selecionada uma catena, de onde foram coletados solos, na profundidade de 0 a 20 cm, no topo da catena (TC), com relevo plano, sem presença de cascalhos, e na posição de meia encosta (ME), apresentando cascalhos na superfície do terreno. O intuito dessa coleta foi avaliar a variação dentro de cada sítio, uma vez que o relevo é um importante fator de formação de solo, interferindo



no grau de desenvolvimento e respectivas características (WANG et al., 2001; ONWEREMADU, 2007). Os solos coletados foram previamente triados em campo, retirando-se raízes e cascalhos.

#### 3.4.2 Instalação e manutenção do experimento

Cada amostra de solo foi peneirada em malha de 4 mm, homogeneizado e depositado em vasos plásticos com volume de 7 L de solo, todos revestidos internamente com plásticos novos não recicláveis para evitar eventual contaminação.

Mudas clonais da cultivar de erva-mate BR5-BRD Yary (WENDLING et al., 2016) foram transplantadas de tubetes para os vasos no dia 21 de março de 2018. As plantas foram cultivadas por 12 meses, em condição de sub-bosque, no sul do Brasil. O clima da região do cultivo das mudas é classificado, segundo sistema de Köppen, como Cfb, subtropical mesotérmico, superúmido, com verões frescos e presença de geadas, sem estação seca (ALVARES et al., 2013). A temperatura média anual de 16,5 °C, com média do mês mais quente e mais frio de 20,1 °C e 12,8 °C, respectivamente. A precipitação anual fica em torno de 1.500 mm ano<sup>-1</sup>, tendo janeiro como o mês de maiores precipitações; e agosto, o de menores (MAACK, 2012). O solo sob cultivo foi mantido próximo à capacidade de campo, por água das chuvas e regas.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, de fatorial 9 sítios X 2 posições na paisagem e com 4 repetições, totalizando 72 vasos.

#### 3.4.3 Preparo do material de estudo

No dia 25 de março de 2019, um ano e quatro dias após o plantio, coletaram-se todas as folhas maduras (aquelas de coloração verde-escuro, completamente expandidas e de consistência rígida) de cada muda, que foram lavadas com água de torneira, enxaguada duas vezes com água deionizada e secas ao ar por cerca de 3-4 h sob bancada e em seguida, secas em micro-ondas por 3 minutos e armazenadas em sacos de papel pardo (TOMASI, 2020). Foi obtida a matéria seca e realizou-se a moagem em moedor de grãos de café até passar por peneira com abertura de malha de 0,149 mm.

#### 3.4.4 Análise do tecido vegetal

A digestão das amostras vegetais foi conduzida em forno de micro-ondas, marca Milestone, modelo ETHOS 1. Em 200 mg de amostra de tecido vegetal foram adicionados 4 mL de ácido nítrico 65% P.A., 3 mL de água ultra-pura e 1 mL de peróxido de hidrogênio, em um tubo de polipropileno. Os tubos foram fechados e submetidos ao micro-ondas a 180 °C por 20 min e, posteriormente, os extratos foram passados em filtro quantitativo de filtragem lenta. Os extratos foram analisados por espectroscopia de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado – ICP-AES (Varian, 720-ES). Para certificação da metodologia e leitura, foi utilizado padrão analítico GBW-10016 *Camellia sinensis*. Apenas elementos com índice de recuperação entre 85 e 100 % foram utilizados para as demais análises.

#### 3.4.5 Determinação das Ácidos Cafeoilquínicos e Cafeína

Para essa análise utilizou-se método adaptado de TOMASI (2020), pesando-se 75 mg de amostra de folhas maduras finamente moídas em tubos Falcon de 15 mL. Foram, então, adicionados 15 mL de água ultra-pura e levados ao banho maria a 80 °C por 1h. Os extratos foram filtrados em filtro quantitativo de filtragem lenta e em seguida com filtro 2 µm.

O extrato foi submetido à cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) Shimadzu®, controlado pelo software LC Solution® e equipado com injetor automático e detector UV (SPD-20A). A separação dos compostos foi realizada utilizando coluna Shim-Pack CLC- ODS (M) (250 x 4,6 mm, d.i. 5 µm), protegida por pré-coluna Shim-Pack CLC G-ODS (10 x 4,0 mm, d.i. 5 µm) ambas da Shimadzu (Kyoto, Japão). A separação dos compostos presentes no extrato aquoso (20 µL de injeção) foi conduzida a 30 °C com o fluxo de 0,5 mL min<sup>-1</sup> de eluente com fase móvel A (H<sub>2</sub>O: ácido acético Alphatec® - 99,9:0,1 v/v) e B (Acetonitrila Merck® - 100 %). A detecção dos compostos foi realizada no comprimento de onda fixo de 280 nm. O programa de eluição gradiente foi: 0–15 min (3% B), 15–20 min (3%–20% B), 20–40 min (20% B), 40–45 min (20–30% B), 45–55 min (30%–100% B), 55–75 (100% B), 75–80 (100 - 3% B) e 80 – 95 (3% B).

A quantificação dos compostos cafeína (1,3,7 - trimetilxantina), ácidos monocateoilquínicos (ácido 3 – cafeoilquínico, ácido 4 – cafeoilquínico, ácido 5 – cafeoilquínico) foi realizada por meio de curva analítica dos padrões cafeína Sigma® conforme a equação:  $y = 0,0308x - 0,0261$  ( $R^2 = 0,9996$ ); ácidos monocateoilquínicos por meio da curva do ácido 3-cafeoilquínico Sigma® conforme a equação:  $y = 0,0194x - 0,1940$  ( $R^2 = 0,9994$ ). Os resultados foram expressos em mg de composto por g de amostra ( $\text{mg g}^{-1}$ ) em base seca.

#### 3.4.6 Análise química do solo

Para determinar o teor de elementos disponíveis no solo foram adicionados 20 mL de  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  e 2 g de terra fina seca ao ar em tubo de polipropileno com capacidade de 100 mL. Esta solução foi agitada por 1 h, centrifugada e passada em filtro quantitativo de filtragem lenta. Os extratos foram analisados por espectroscopia de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado – ICP-AES (Varian, 720-ES). A caracterização química dos solos pode ser consultada na TABELA 2 (CAPÍTULO 1).

#### 3.4.7 Análise estatística

A normalidade dos dados foi testada por meio do teste de Shapiro-Wilk, e a homocedasticidade, através do teste de Bartlett. Os dados que não apresentaram normalidade e/ou homocedasticidade foram transformados por Box-Cox, para atender aos critérios da ANOVA. Nos casos em que a ANOVA indicou diferenças significativas entre os tratamentos, foi utilizado o teste Tukey de comparação de médias. Análises multivariadas foram realizadas para obtenção de agrupamentos hierárquicos e regressões múltiplas a fim de verificar a relação entre os teores de elementos no solo ou no tecido e os compostos secundários. As análises dos dados foram efetuadas no *software R* (R Core Team 2017).

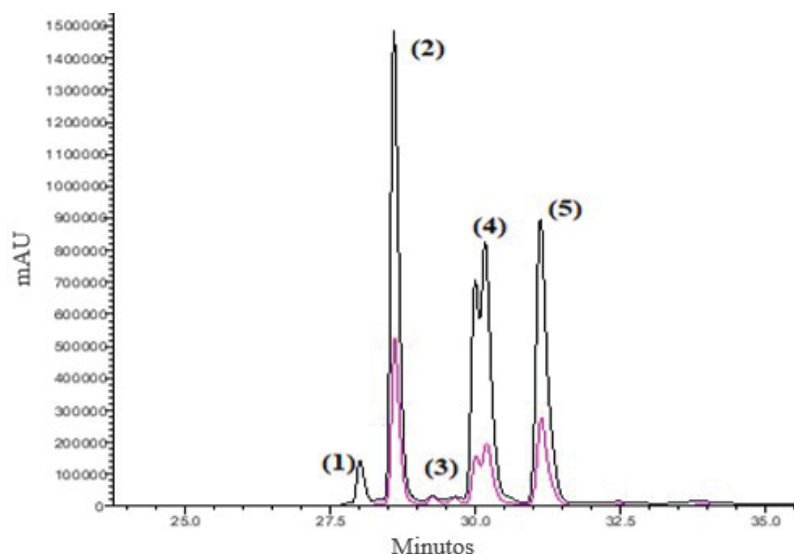
### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O composto secundário encontrado em maiores teores, entre os estudados, foi o ácido 5-cafeoilquínico, seguido pela cafeína, ácido 4-cafeoilquínico e ácido 3-cafeoilquínico, com teores médios respectivos de  $51,12 \pm 14,32 \text{ mg g}^{-1}$ ,  $18,74 \pm 7,68 \text{ mg g}^{-1}$ ,  $25,12 \pm 9,23 \text{ mg g}^{-1}$  e  $14,93 \pm 6,43 \text{ mg g}^{-1}$ . Os teores de ácidos cafeoilquínicos totais (3-ACQ+4-ACQ+5-ACQ) ficaram dentro da faixa relatada na literatura para erva-mate, que contempla teores de 17,52 a 127,7  $\text{mg g}^{-1}$ , sendo, em geral, influenciados pela época de colheita, variedade, nível de sombreamento e processamento industrial (MARQUES E FARAH, 2009; CARDOZO JUNIOR et al., 2010; BERTÉ et al., 2011a; ANESINI et al., 2012; SOUZA et al., 2015; BUTIUK et al., 2016; MEINHORT et al., 2017; RIACHI et al., 2018; ZIELINSKI et al., 2020). Os teores de cafeína também ficaram de acordo com a faixa relatada na literatura, que apresenta grande variação, desde 3,66 a 27,17  $\text{mg g}^{-1}$  (SCHERER et al., 2002; CARDOZO JUNIOR et al., 2010; BERTÉ et al., 2011b; ANESINI et al., 2012; RIACHI et al., 2018; SCHUBERT et al., 2006; ZIELINSKI et al., 2020).

Os teores foliares de 5-ACQ, principal ácido cafeoilquínico, e por consequência, o ACQ total, não apresentaram diferenças de acordo com os solos em que as plantas foram cultivadas, enquanto os de cafeína diferiram (TABELA 3). A variação entre o perfil cromatográfico dos extratos obtidos a partir dos tratamentos pode ser observada na FIGURA 12, onde estão os solos que levaram a produções de cafeína mais contrastantes - Cascavel ME e Ilópolis TC.

Cascavel ME foi um solo com fertilidade relativamente elevada entre os solos do estudo, mas que resultou em baixa produção de matéria seca ( $39,08 \pm 7,81 \text{ g}$ ), enquanto Ilópolis TC foi um solo de fertilidade intermediária, com pH baixo e teores elevados de Al disponível, levou ao dobro da produção média de matéria seca ( $80,53 \pm 20,63 \text{ g}$ ), em relação a Cascavel ME (TABELA 2 – CAPÍTULO 1).

FIGURA 12 - HPLC CROMATOGRAMA DE SOLUÇÃO AQUOSA DE *Ilex paraguariensis* CULTIVADA EM SOLOS DE CASCAVEL MEIA ENCOSTA (EM PRETO) E EM ILÓPOLIS TOPO DE CATENA (EM ROSA). DETECTOR UV A 280 nm.



FONTE: O Autor (2021)

(1): Teobromina; (5): Cafeína (1,3,7 - trimetilxantina); (3): 3-ACQ (ácido 3-cafeoilquínico); (4): 4-ACQ (ácido 4-cafeoilquínico) e (2): 5-ACQ (ácido 5-cafeoilquínico).

TABELA 3 – TEOR FOLIAR DE ÁCIDO CAFEILOQUÍNICO (ACQ) E CAFEÍNA EM MUDAS DE ERVA-MATE DE ACORDO COM O SOLO ORIUNDOS DA REGIÃO DE OCORRÊNCIA NATURAL DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL

Solos	3-ACQ		4-ACQ		5-ACQ		ACQ Total		Cafeína	
	-----mg g <sup>-1</sup> -----									
Barão do Cotegipe ME	13,25	ab	22,12	ab	60,66	a	96,04	a	24,73	ab
Barão do Cotegipe TC	16,50	ab	22,86	ab	37,51	a	76,87	a	14,14	ab
Cascavel ME	16,90	ab	28,88	ab	62,16	a	107,93	a	30,08	a
Cascavel TC	24,34	a	32,33	ab	52,68	a	109,35	a	19,74	ab
Cruz Machado ME	20,03	ab	29,98	ab	50,25	a	100,26	a	18,46	ab
Cruz Machado TC	11,32	ab	22,03	ab	56,44	a	89,79	a	15,62	ab
Faxinal do Céu ME	8,81	b	17,81	ab	41,78	a	68,40	a	17,31	ab
Faxinal do Céu TC	15,43	ab	17,87	ab	53,86	a	87,16	a	14,85	ab
Fernandes Pinheiro TC	18,95	ab	33,96	a	64,55	a	117,47	a	16,62	ab
Fernandes Pinheiro ME	14,02	ab	35,59	a	65,74	a	115,35	a	26,58	ab
Ilópolis ME	17,97	ab	30,25	ab	53,71	a	101,93	a	17,89	ab
Ilópolis TC	10,15	ab	14,15	b	36,86	a	61,16	a	11,28	b
Mallet ME	14,68	ab	24,32	ab	49,25	a	88,25	a	15,59	ab
Mallet TC	9,45	ab	18,37	ab	45,87	a	73,69	a	25,82	ab
São João do Triunfo ME	10,50	ab	19,65	ab	38,09	a	68,24	a	12,28	ab
São João do Triunfo TC	14,71	ab	24,91	ab	43,80	a	83,42	a	15,15	ab
Seara ME	12,45	ab	28,40	ab	54,83	a	95,68	a	24,52	ab
Seara TC	19,12	ab	32,08	ab	58,43	a	109,62	a	14,25	ab

FONTE: O Autor (2021)

TC – Topo de Catena e ME – Meia encosta; Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa (p-valor<0,05).

A diferença na produção de cafeína induzida por esses dois solos pode ser explicada pela hipótese balanço crescimento-diferenciação. Essa hipótese indica que a alocação de recursos na planta é determinada por uma competição interna por substratos comuns a diferentes processos metabólicos, bem como a competição por energia (GAYLER et al., 2008; SENTHILKUMAR et al., 2014). Dessa forma, é possível que Cascavel ME tenha acumulado fotoassimilados, por ser um solo relativamente rico, mas devido a baixa disponibilidade de Zn – elemento responsável pela ativação de enzimas ligadas ao crescimento vegetal - não foi capaz de utilizar os compostos assimilados no seu processo de crescimento, fazendo uso, então, para a produção de compostos secundários. O oposto pode ter ocorrido com plantas cultivadas em solos de Ilópolis TC, que permitiram a conversão de fotoassimilados em compostos estruturais, mas por ser um solo mais pobre a produção de compostos secundários não ocorreu de forma proporcional ao seu crescimento, uma vez que os processos de crescimento são sempre priorizados pelas plantas (HAUKIOJA et al., 1998; GAYLER et al., 2008). Apesar dos teores de ACQ total não apresentarem diferença entre os solos (TABELA 3), os teores nas plantas cultivadas em Ilópolis TC seguem o mesmo padrão do apresentado para a cafeína.

As correlações entre produção de ACQ total e cafeína em mudas de erva-mate e teores de elementos disponíveis nos solos foram fracas (TABELA 4). Modelos de regressão múltipla, utilizando teores de elementos nos 18 solos, também não foram capazes de explicar a variabilidade observada para cafeína e ACQ total (TABELA 5). A baixa correlação entre teor de elementos no solo e produção de compostos secundários também foi verificada por Morales-Ramos et al. (2020), que ao analisar o efeito de fatores ambientais, obtiveram baixa explicação dos teores de ACQ e cafeína em grãos verdes de café, a partir dos teores de elementos no solo. Não foi detectada diferença para teores de cafeína por SANTIN (2008), ao avaliar os efeitos de adubação NPK em erva-mate.

TABELA 4 - CORRELAÇÕES ENTRE TEORES DE ELEMENTOS DISPONÍVEIS NOS 18 SOLOS, REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL, E OS TEORES DE ÁCIDO CAFEÓILQUÍNICO TOTAL E CAFEÍNA EM MUDAS DE ERVA-MATE.

Composto	S	Al	Ba	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn	MO
Cafeína	0,17	-0,11	0,47**	0,25*	-0,09	0,30*	0,41**	0,17	0,26*	0,29*	-0,03	<0,01
ACQ Total	-0,10	-0,25*	0,21	0,27*	-0,25*	0,17	0,27*	0,15	0,05	0,24*	0,07	0,05

FONTE: O Autor (2021)

\*p-valor<0,05 e \*\*p-valor<0,001

TABELA 5 - COEFICIENTES DE MODELOS DE REGRESSÃO PARA TEORES DE CAFEÍNA E ÁCIDO CAFEÓILQUÍNICO (ACQ) EM FOLHAS DE ERVA-MATE DE ACORDO COM VARIÁVEIS DOS 18 SOLOS, REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL.

Variáveis do Solo	Cafeína		3-ACQ		4-ACQ		5-ACQ		ACQ Total	
	$\beta$	Pr(> t )	$\beta$	Pr(> t )	$\beta$	Pr(> t )	$\beta$	Pr(> t )	$\beta$	Pr(> t )
Interceptor	-8,86 10 <sup>-16</sup>	1,000	-9,38 10 <sup>-16</sup>	1,000	-9,70 10 <sup>-16</sup>	1,000	-1,03 10 <sup>-15</sup>	1,000	0,01	0,916
Ba	-4,38 10 <sup>-1</sup>	0,176	-6,94 10 <sup>-1</sup>	0,030 *	-7,35 10 <sup>-1</sup>	0,022 *	-6,85 10 <sup>-1</sup>	0,033 *	-0,48	0,125
Mg	1,12	0,232	7,34	0,419	-9,15 10 <sup>-1</sup>	0,314	7,46 10 <sup>-1</sup>	0,415	1,29	0,138
K	-1,32	0,026 *	-1,23	0,033 *	-1,27	0,028 *	-1,23	0,034 *	-0,44	0,429
Al	1,69	0,045 *	1,29	0,115	1,54	0,059	1,48	0,072	1,23	0,121
S	-2,32	0,005 **	-2,18	0,007 **	-2,39	0,003 **	-2,32	0,004 **	-1,46	0,068
Fe	1,39	0,037 *	1,38	0,033 *	1,46	0,025 *	1,45	0,027 *	0,74	0,241
Zn	2,27	0,008 **	2,25	0,006 **	2,39	0,004 **	2,36	0,004 **	1,75	0,033 *
Cu	1,72	0,028 *	1,64	0,030 *	1,77	0,020 *	1,68	0,028 *	1,6	0,032 *
P	1,2	0,010 *	1,22	0,007 **	1,3	0,004 **	1,3	0,005 **	0,53	0,239
Mn	-3,99 10 <sup>-1</sup>	0,492	-5,57	0,326	-5,62 10 <sup>-1</sup>	0,321	-6,49 10 <sup>-1</sup>	0,256	-1,34	0,015 *
Si	-1,94	0,092	-1,69	0,131	-1,85	0,098	-1,71	0,129	-0,74	0,49
MO	-5,34 10 <sup>-1</sup>	0,076	-5,33	0,069	-5,69 10 <sup>-1</sup>	0,052	-5,69 10 <sup>-1</sup>	0,054	-0,58	0,042 *
pH	2,14	0,003 **	2,23	0,001 **	2,35	0,001 ***	2,4	<0,001	1,02	0,154
R <sup>2</sup>	0,219		0,26		0,259		0,249		0,342	
p_valor	0,313		0,153		0,154		0,189		0,024 *	

FONTE: O Autor (2021)

\*p-valor<0,05 e \*\*p-valor<0,001



A baixa correlação dos teores de elementos disponíveis no solo e produtividade de compostos secundários pode estar relacionada à alta plasticidade fenológica das plantas, que fazem diversos controles metabólicos através de substâncias sinalizadoras, controladas por múltiplos genes, em resposta a fatores ambientais (NITAO et al., 2002; YANG et al., 2018). Ainda assim, ZAMPIER (2001) obteve aumento na produção de cafeína em plantas de erva-mate que receberam adubações orgânicas, mas não naquelas que receberam adubações minerais com doses de NPK. Um estudo de meta-análise a partir de 25 publicações realizado por QIAO et al. (2018) verificou que fertilizações com N elevam, em média, 18% o teor de cafeína em *Camellia sinensis*. A forma de N disponível afeta a expressão de genes ligados ao metabolismo da cafeína, em *C. sinensis*, sendo que o N na forma de  $\text{NH}_4^+$  aumenta a expressão desses genes quando comparado com N na forma de  $\text{NO}_3^-$  (YANG et al., 2018).

Em ervais nativos, a deposição de serrapilheira é geralmente alta, mantendo elevados teores de MO no solo (SANTIN et al., 2019), como obtido nesse estudo (TABELA 2 – CAPÍTULO 1). A maior parte do N total dos solos é encontrada na forma orgânica (cerca de 90%), sendo comum relacionar teores de MO no solo com disponibilidade de N para as plantas (CANTARELLA et al., 2008). No entanto, o teor de MO não apresentou correlação com a produção de cafeína (TABELA 4). Isso provavelmente se deve à disponibilização de N a partir da MO por meio do processo de mineralização, que é controlado por diversos fatores como temperatura, umidade, qualidade da MO e atividade microbiana (SCHMIDT et al., 2015). É possível que o teor de N disponível para as plantas tenha baixa correlação com o teor de MO do solo devido a diferenças na qualidade da MO presente, sendo em alguns solos a MO estar mais recalcitrante do que em outros, ou ainda devido a diferenças na atividade microbiana desses solos. E, embora o teor de MO não tenha sido significativo para explicar a variabilidade dos dados para 3-ACQ, 4-ACQ e 5-ACQ, apresentou influência negativa no teor de ACQ total. Resultado também encontrado por MORALES-RAMOS et al. (2020) relativo ao composto 5-ACQ em grãos verdes de café. E ainda relacionando N no solo com teores de ACQ, GIORGI et al. (2009) verificaram que plantas de *Achillea collina* deficientes em N apresentaram maiores teores de 5-ACQ do que plantas controle. Esses resultados corroboram com a hipótese de que compostos fenólicos são afetados negativamente pelo teor de N disponível no solo.



TABELA 6 - CORRELAÇÕES ENTRE TEORES DE ELEMENTOS FOLIARES E TEORES DE ÁCIDO CAFEILOQUÍNICO TOTAL E CAFEÍNA EM FOLHAS DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVAS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL.

Composto	S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
Cafeína	0,27*	-0,28*	-0,35	0,03	0,18	-0,14	0,34**	-0,10	-0,30*	0,40**	-0,39**	-0,18
ACQ Total	-0,02	-0,28*	-0,17	0,07	-0,01	-0,24*	0,19	0,04	0,00	0,05	-0,26*	0,21

FONTES: O Autor (2021)

Ácido Cafeoilquínico total (ACQ TOTAL); \*p-valor<0,05 e \*\*p-valor<0,001

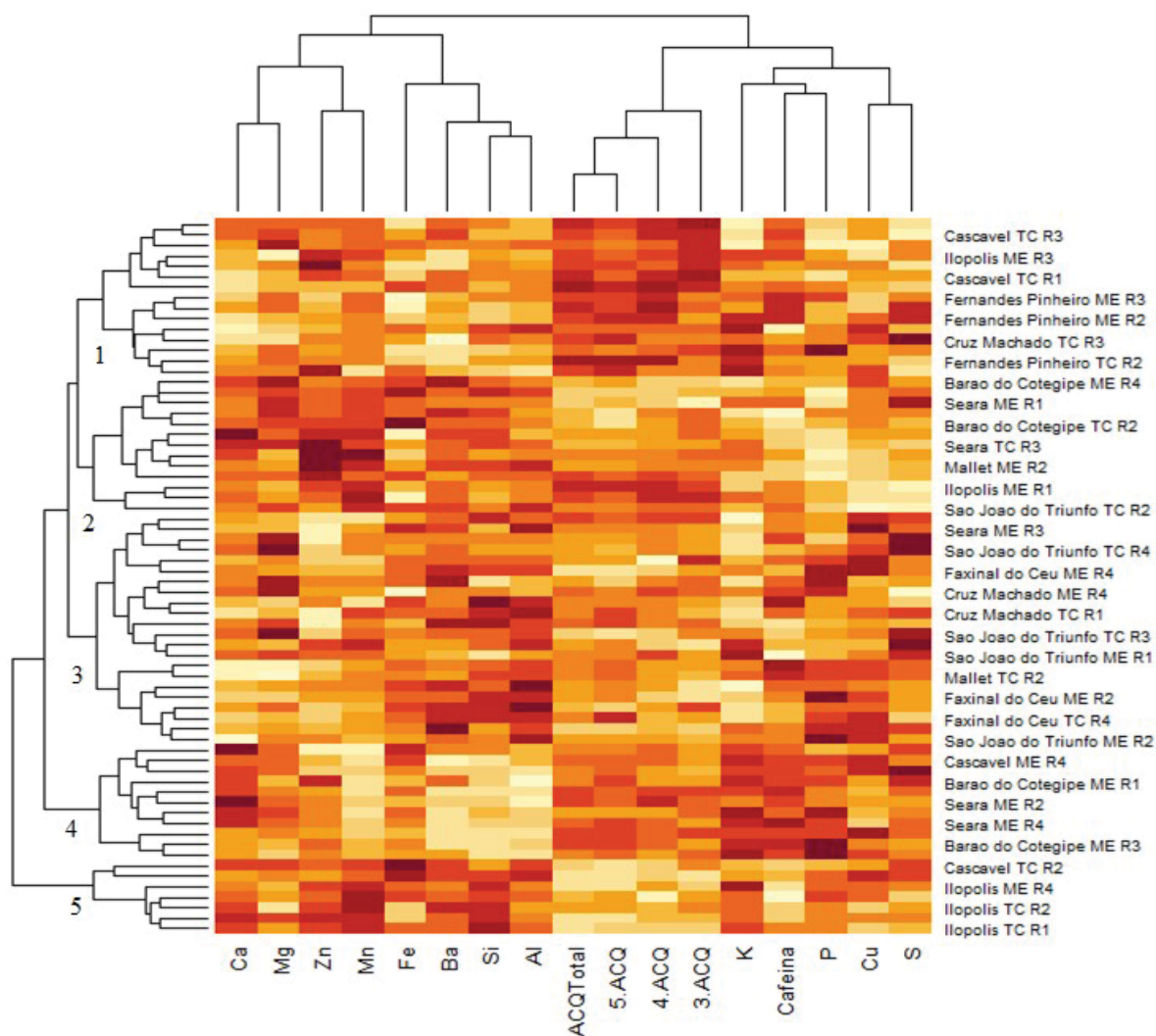
TABELA 7 - COEFICIENTES DE MODELOS DE REGRESSÃO PARA TEORES DE CAFEÍNA E ÁCIDO CAFEILOQUÍNICO TOTAL EM FOLHAS DE ERVA-MATE DE ACORDO COM TEORES DE ELEMENTOS FOLIARES DE PLANTAS CULTIVADAS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL

Variáveis do Solo	Cafeína			3-ACQ			4-ACQ			5-ACQ			ACQ Total		
	$\beta$	Pr(> t )	$\beta$	$\beta$	Pr(> t )	$\beta$	$\beta$	Pr(> t )	$\beta$	$\beta$	Pr(> t )	$\beta$	$\beta$	Pr(> t )	$\beta$
Interceptor	5,32 10 <sup>-17</sup>	1,000	-2,38 10 <sup>-16</sup>	1,000	1,000	2,31 10 <sup>-16</sup>	2,03 10 <sup>-16</sup>	1,000	3,76 10 <sup>-16</sup>	1,000	3,76 10 <sup>-16</sup>	1,000	3,76 10 <sup>-16</sup>	1,000	3,76 10 <sup>-16</sup>
Ba	-1,17 10 <sup>-1</sup>	0,538	1,31 10 <sup>-1</sup>	0,514	0,514	4,85 10 <sup>-3</sup>	5,62 10 <sup>-3</sup>	0,981	3,57 10 <sup>-2</sup>	0,977	3,57 10 <sup>-2</sup>	0,862	3,57 10 <sup>-2</sup>	0,862	3,57 10 <sup>-2</sup>
Mg	-7,44 10 <sup>-2</sup>	0,659	2,59 10 <sup>-1</sup>	0,150	0,150	1,57 10 <sup>-1</sup>	-1,44 10 <sup>-1</sup>	0,392	3,86 10 <sup>-2</sup>	0,415	3,86 10 <sup>-2</sup>	0,833	3,86 10 <sup>-2</sup>	0,833	3,86 10 <sup>-2</sup>
K	-3,36 10 <sup>-2</sup>	0,868	-2,78 10 <sup>-2</sup>	0,896	0,896	-8,78 10 <sup>-2</sup>	-7,58 10 <sup>-2</sup>	0,688	-7,64 10 <sup>-2</sup>	0,720	-7,64 10 <sup>-2</sup>	0,728	-7,64 10 <sup>-2</sup>	0,728	-7,64 10 <sup>-2</sup>
Al	1,11 10 <sup>-1</sup>	0,644	-1,43 10 <sup>-1</sup>	0,575	0,575	-8,08 10 <sup>-2</sup>	-1,25 10 <sup>-1</sup>	0,757	-1,27 10 <sup>-1</sup>	0,621	-1,27 10 <sup>-1</sup>	0,627	-1,27 10 <sup>-1</sup>	0,627	-1,27 10 <sup>-1</sup>
S	2,58 10 <sup>-1</sup>	0,073	-1,30 10 <sup>-1</sup>	0,389	0,389	-1,38 10 <sup>-2</sup>	1,04 10 <sup>-1</sup>	0,928	1,92 10 <sup>-2</sup>	0,487	1,92 10 <sup>-2</sup>	0,901	1,92 10 <sup>-2</sup>	0,901	1,92 10 <sup>-2</sup>
Fe	-1,13 10 <sup>-1</sup>	0,489	-5,34 10 <sup>-1</sup>	0,758	0,758	-1,66 10 <sup>-1</sup>	-1,99 10 <sup>-1</sup>	0,349	-1,74 10 <sup>-1</sup>	0,248	-1,74 10 <sup>-1</sup>	0,329	-1,74 10 <sup>-1</sup>	0,329	-1,74 10 <sup>-1</sup>
Zn	-1,48 10 <sup>-3</sup>	0,992	2,77 10 <sup>-1</sup>	0,089	0,089	2,90 10 <sup>-1</sup>	3,72 10 <sup>-1</sup>	0,082	3,60 10 <sup>-1</sup>	0,023*	3,60 10 <sup>-1</sup>	0,033*	3,60 10 <sup>-1</sup>	0,033*	3,60 10 <sup>-1</sup>
Cu	-1,10 10 <sup>-2</sup>	0,943	2,11 10 <sup>-1</sup>	0,200	0,200	4,11 10 <sup>-2</sup>	1,56 10 <sup>-1</sup>	0,806	1,46 10 <sup>-1</sup>	0,338	1,46 10 <sup>-1</sup>	0,386	1,46 10 <sup>-1</sup>	0,386	1,46 10 <sup>-1</sup>
P	3,24 10 <sup>-1</sup>	0,046*	1,14 10 <sup>-1</sup>	0,503	0,503	-7,41 10 <sup>-2</sup>	-3,66 10 <sup>-2</sup>	0,669	-1,74 10 <sup>-2</sup>	0,827	-1,74 10 <sup>-2</sup>	0,920	-1,74 10 <sup>-2</sup>	0,920	-1,74 10 <sup>-2</sup>
Mn	-1,76 10 <sup>-2</sup>	0,914	2,28 10 <sup>-1</sup>	0,195	0,195	8,79 10 <sup>-3</sup>	-1,28 10 <sup>-1</sup>	0,961	-1,04 10 <sup>-2</sup>	0,460	-1,04 10 <sup>-2</sup>	0,953	-1,04 10 <sup>-2</sup>	0,953	-1,04 10 <sup>-2</sup>
Ca	1,83 10 <sup>-1</sup>	0,294	-1,11 10 <sup>-1</sup>	0,547	0,547	-5,48 10 <sup>-2</sup>	-8,31 10 <sup>-2</sup>	0,771	-8,89 10 <sup>-2</sup>	0,649	-8,89 10 <sup>-2</sup>	0,639	-8,89 10 <sup>-2</sup>	0,639	-8,89 10 <sup>-2</sup>
Si	-2,60 10 <sup>-1</sup>	0,120	-1,89 10 <sup>-1</sup>	0,284	0,284	-3,11 10 <sup>-1</sup>	-2,80 10 <sup>-1</sup>	0,087	-2,99 10 <sup>-1</sup>	0,111	-2,99 10 <sup>-1</sup>	0,102	-2,99 10 <sup>-1</sup>	0,102	-2,99 10 <sup>-1</sup>
R <sup>2</sup>	0,33		0,24			0,21	0,26		0,203		0,203		0,203		0,203
p_valor	0,02*		0,158			0,288	0,116		0,328		0,328		0,328		0,328

FONTES: O Autor (2021); Ácido Cafeoilquínico total (ACQ TOTAL); \*p-valor<0,05 e \*\*p-valor<0,001

Os teores foliares de elementos em erva-mate não apresentaram correlações fortes com teores de ACQ total e cafeína (TABELA 6), ao contrário de ZAMPIER (2001) que verificou correlações entre os teores foliares de Ca ( $r=0,81$ ), Mg ( $r=0,90$ ) e Mn ( $r=-0,89$ ) com teores de cafeína em mudas de erva-mate.

FIGURA 13 - AGRUPAMENTOS HIERÁRQUICOS OBTIDOS POR ANÁLISES MULTIVARIADAS ENTRE OS TEORES DE ELEMENTOS, CAFEÍNA E ÁCIDOS CAFEÓILQUÍNICOS EM FOLHAS DE EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL



FONTE: O Autor (2021)

Cada elemento e/ou composto tem sua respectiva escala de cor, em que o valor mais alto é considerado 100% e cor mais intensa e gradativamente diminui até o valor mais baixo e cor pálida. TC – Topo de Catena e ME – Meia Encosta. R1 – repetição 1, R2 - repetição 2, R3 -repetição 3 e R4 – repetição 4

A partir da análise de agrupamento em que o resultado está apresentado na FIGURA 13, identifica-se que o grupo 1 formado por plantas cultivadas em solos de diferentes origens (Cascavel e Cruz Machado – basáltica, Ilópolis – riodacítica,

Fernandes Pinheiro – sedimentar), diferentes posições na paisagem (TC – topo de catena e ME – meia encosta) apresentou teores elevados de ácidos cafeoilquínico e concentrações distintas de elementos no tecido.

Teores elevados de cafeína foram constatados em vários grupos apresentados na FIGURA 13, mas houve uma concentração maior no grupo 4, formado por plantas cultivadas em solos de maior fertilidade e folhas com baixos teores de Mn, Ba, Si e Al e teores mais elevados de Ca, K e P. Altos teores de cafeína também foram associados a folhas com teores elevados de Al e baixos teores de Ca como no grupo 3 - para Mallet TC R2 (repetição 2) e Cruz Machado ME R4 (repetição 4) - e em folhas com baixos teores de Ca e Mn, no grupo 1 - para plantas cultivadas com Fernandes Pinheiro ME R2 e R3 (repetição 2 e 3). Dessa forma, não foi possível identificar um padrão de teores de elementos em folhas de erva-mate que explique os teores de ACQ ou cafeína. Os indicadores dos modelos de regressão múltipla confirmam esse fato (TABELA 7). Outras fontes possíveis de variação podem ter sido preponderantes, como a estrutura da comunidade microbiana, que pode alterar a disponibilidade dos elementos ou mesmo ataques eventuais de pragas. Ataques de pragas podem levar a respostas fisiológicas de defesa da planta, impulsionando a produção de compostos secundários. Os ácidos cafeoilquínico, que fazem parte da família de ácidos conhecida como ácido clorogênico, são compostos intermediários na biossíntese da lignina e atuam como antioxidantes em resposta a estresses bióticos (ZHANG et al., 2018). A cafeína também atua como agente de defesa da planta, principalmente de duas formas: restringindo o desenvolvimento de outros organismos e como sinalizadora, estimulando o sistema de defesa da planta (SUGIYAMA et al., 2016).

Apesar de ser possível classificar a erva-mate por região a partir de sua composição em compostos secundários, segundo ZIELINSKI et al. (2020), os autores indicam que outros fatores além do solo, como clima, variedades, sombreamento, estação de colheita e processamento devem ser considerados ao avaliar o efeito da região na produção desses compostos. Em uma mesma região, é natural que ocorra a opção por formas de manejo e processamento similares. Algumas regiões podem apresentar um predomínio de plantios sombreados e em outras de plantios a pleno sol, por exemplo. Dessa forma, o fator solo atuaria apenas marginalmente sobre os teores de compostos secundários em folhas de erva-mate.

### 3.6 CONCLUSÕES

Os teores de cafeína em folhas de erva-mate variaram de acordo com os solos onde a planta foi cultivada, mas não foi possível correlacionar os teores de elementos no solo ou na folha com teores de compostos secundários. O fato de terem sido estudados solos muito distintos quimicamente, com múltiplas interações entre elementos em cada um deles e com possível variação na comunidade microbiana, pode ter levado a uma grande multiplicidade de respostas fenotípicas, impedindo uma correlação direta entre teores de elementos e teores de ácidos monocateoiloquínicos e cafeína foliares. Deve-se salientar que esse estudo foi feito com plantas muito jovens, sendo que o estágio fisiológico da planta é capaz de alterar essas relações.

### 3.7 REFERÊNCIAS

ANESINI, C.; TURNER, S.; COGOI, L.; FILIP, R. Study of the participation of caffeine and polyphenols on the overall antioxidant activity of mate (*Ilex paraguariensis*). **Food Science and Technology**, v. 45, 299e304, 2012.

BERTÉ, K. A. S.; IZIDORO, D. R.; DUTRA, F. L. G.; HOFFMANN-RIBANI, R. Desenvolvimento de gelatina funcional de erva-mate. **Ciência Rural**, v.41, n.2, p.354-360, 2011a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782011000200029>. Acesso em: 26 mar. 2019.

BERTÉ, K. A.S.; BEUX, M.R.; SPADA, P.K.W.D.S.; SALVADOR, M.; HOFFMANN-RIBANI, R. Chemical Composition and Antioxidant Activity of Yerba-Mate (*Ilex paraguariensis* A.St.-Hil., Aquifoliaceae) Extract as Obtained by Spray Drying. **J. Agric. Food Chem.**, v.59, p.5523–5527, 2011b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/jf2008343>. Acesso em: 04 abr. 2019.

BORGES, R.; BOFF, M.I.C.; MANTOVANI, A.; RADOMSKI, M.I. Effect of cover on the development and production of secondary compounds of *Maytenus ilicifolia* and *Ilex paraguariensis* in agroforestry systems. **Ci. Fl.**, v. 29, n. 4, p. 1630-1643, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832280>. Acesso em: agost. 2020.

BUTIUK, A.P.; MARTOS, M.A; ADACHI, O.; HOURS R.A. Study of the chlorogenic acid content in yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.): Effect of plant fraction,

processing step and harvesting season. **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**, v. 3, p. 27–33, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jarmap.2015.12.003>. Acesso em: 15 out 2019.

CANTARELLA, H; ANDRADE, C. A.; MATTOS JÚNIOR, D. Matéria orgânica do solo e disponibilidade de N as plantas. In: SANTOS, G. A. et al. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 581-595.

CARDOZO JUNIOR, E.L.; DONADUZZI, C.M.; FERRARESE-FILHO, O.; FRIEDRICH, J. C.; GONELA, A.; STURION, J. A. Quantitative genetic analysis of methylxanthines and phenolic compounds in mate progênies. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.45, n.2, p.171-177, fev. 2010.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: EMBRAPA informação Tecnológica; Colombo: EMBRAPA/Florestas, v.1. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras). 2003.

COELHO, G.C.; RACHWAL, M.F.G.; DEDECEK, R.A.; CURCIO, G.R.; NIETSCHKE, K.; SCHENKEL, E.P. Effect of light intensity on methylxanthine contents of *Ilex paraguariensis* A. St. Hil. **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 35, 75e80, 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bse.2006.09.001>. Acesso em: 30 mar. 2019.

CROGE, C. P.; CUQUEL, F. L.; PINTRO, P. T. M. Yerba mate: cultivation systems, processing and chemical composition. A review. **Scientia Agricola**, v. 78, n.5, e20190259, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0259>. Acesso em: 10 fev. 2021.

DARTORA, N.; DE SOUZA, L.M.; SANTANA-FILHO, A.P.; IACOMINI, M.; VALDUGA, A.T.; GORIN, P.A.J.; SASSAKI, G.L. UPLC-PDA–MS evaluation of bioactive compounds from leaves of *Ilex paraguariensis* with different growth conditions, treatments and ageing. **Food Chemistry**, v. 129, n.4, p.1453-1461, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.05.112>. Acesso em: 19 mar. 2019.

GAYLER, S.; GRAMS, T.E.E.; HELLER, W.; TREUTTER, D.; PRIESACK, E. A Dynamical Model of Environmental Effects on Allocation to Carbon-based Secondary Compounds in Juvenile Trees. **Annals of Botany**, v. 101, p. 1089–1098, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcm169>. Acesso em: 28 mar. 2019.

GERKE, I. B.B.; HAMERSKI, F.; SCHEER, A.; SILVA, V. Solid-liquid extraction of bioactive compounds from yerba mate (*Ilex paraguariensis*) leaves: Experimental study, kinetics and modeling. **Journal of Food Process Engineering.**, v. 41, e12892, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/jfpe.12892>. Acesso em: 30 mar. 2019.

GIORGI A.; MINGOZZI M.; MADEO M.; SPERANZA G.; COCUCCHI M. Effect of nitrogen starvation on the phenolic metabolism and antioxidant properties of yarrow (*Achillea collina* Becker ex Rchb.). **Food Chemistry**, v.114, n.1, p.204-211, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.039>. Acesso em: 14 abr. 2019.

GOBBO-NETO, L.; LOPES, N.P. Plantas medicinais: fatores de influência no conteúdo de metabólitos secundários. **Quim. Nova**, v.30, n.2, p.374-381, 2007.

HAUKIOJA, E.; OSSIPOV, V.; KORICHEVA, J.; HONKANEN, T.; LARSSON, S.; LEMPA, K. Biosynthetic origin of carbon-based secondary compounds: cause of variable responses of woody plants to fertilization? **Chemoecology**, v. 8, p.133–139, 1998.

ISAH, T. Stress and defense responses in plant secondary metabolites production. **Biol Res**, v. 52, n.39, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40659-019-0246-3>. Acesso em: 17 out 2020.

KARPINSKA J.; ŚWISŁOCKA R.; LEWANDOWSKI W. A mystery of a cup of coffee; an insight look by chemist. **Biofactors**, v.43, n.5, p.621-632, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/biof.1371>. Acesso em: 5 nov. 2019.

LIMA, J. P.; FARAH, A.; KING, B.; DE PAULIS, T.; MARTIN, P. R. Distribution of Major Chlorogenic Acids and Related Compounds in Brazilian Green and Toasted *Ilex paraguariensis* (Maté) Leaves. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.64, n.11, p.2361-2370, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00276>. Acesso em: 28 nov. 2019.

LIU, D.; WANG, H.; ZHANG, Y.; ZHANG, Z. Protective Effects of Chlorogenic Acid on Cerebral Ischemia/Reperfusion Injury Rats by Regulating Oxidative Stress-Related Nrf2 Pathway. **Drug Des Devel Ther.**, v.7, n.14, p.51-60, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2147/DDDT.S228751>. Acesso em: 25 jan. 2021.

LOURENÇO, R.S.; CURCIO, G.R.; RACHWAL, M.G.; MEDRADO, M.J.S. Avaliação de níveis de nitrogênio sobre a produção de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.)



em Fernandes Pinheiro, PR, em Latossolo Vermelho Escuro. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.34, p.75-98, 1997.

LUTOMSKI, P.; GOŹDZIEWSKA, M.; FLOREK-ŁUSZCZKI, M. Health properties of Yerba Mate. **Ann Agric Environ Med.**, v. 27, n. 2, p.310-313, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.26444/aaem/119994>. Acesso em: 16 jan. 2021.

MARQUES, V.; FARAH, A. Chlorogenic acids and related compounds in medicinal plants and infusions. **Food Chemistry**, v. 113, p. 1370–1376, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.086>. Acesso em: 23 out 2019.

MÁRQUEZ, V.; MARTÍNEZ, N.; GUERRA, M.; FARIÑA, L.; BOIDO, E.; DELLACASSA, E. Characterization of aroma-impact compounds in yerba mate (*Ilex paraguariensis*) using GC–olfactometry and GC–MS. **Food Research International**, v. 53, p.808–815, 2013.

MORALES-RAMOS, V.; ESCAMILLA-PRADO, E.; RUIZ-CARBAJAL, R. A.; PÉREZ-SATO, J. A.; VELÁZQUEZ-MORALES, J.A.; SERVÍN-JUÁREZ, R. On the soil–bean–cup relationships in *Coffea arabica* L. **J Sci Food Agric**, v. 100, p. 5434–5441, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.10594>. Acesso em: 10 jan. 2021.

MURAKAMI, A. N. N.; AMBONI, R.D.M.C.; PRUDÊNCIO, E.S.; AMANTE, E.R.; FRITZEN-FREIRE, C.B.; BOAVENTURA, B. C. B.; I.B.; BRANCO, C.S.; SALVADOR, M.; MARASCHIN, M. Concentration of biologically active compounds extracted from *Ilex paraguariensis* St. Hil. by nanofiltration. **Food Chemistry**, v. 141, n.1, p. 60-65, 2013.

NITAO, J.K.; ZANGERL, A.R.; BERENBAUM, M.R. CNB: requiescat in pace? **OIKOS**, v. 98, n.3, p. 540-546, 2002.

ONWEREMADU, E.U. Availability of Selected Soil Nutrients in Relation to Land Use and Landscape Position. **International Journal of Soil Science**, v. 2, p.128-134, 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3923/ijss.2007.128.134>. Acesso em: 13 out. 2019.

QIAO, C.; XU, B.; HAN, Y.; WANG, J.; WANG, X.; LIU, L.; LIU, W.; WANG, S.; TAN, H.; LIU, Y.; ZHAO, X. Synthetic nitrogen fertilizers alter the soil chemistry, production and quality of tea. A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v.38, n. 10, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-017-0485-z>. Acesso em: 14 agost. 2019.

RIACHI, L. G.; SIMAS, D.L.R; COELHO, G.C.; MARCELLINI, P.S.; SILVA, A.J.R.; MARIA, C. A. B. Effect of light intensity and processing conditions on bioactive compounds in maté extracted from yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.). **Food Chemistry**, v. 266, p. 317–322, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.028>. Acesso em: 04 fev. 2020.

ROSSA, U.B.; CAMARGO, A.; MAZUCHOWSKI, A.J.Z.; WESTPHALEN, D.J.; FRIZON, C.N.T.; MARTINS, C.E.N. Influence of light and fertilizer on methylxantines and phenolic compound in leaves of mate tea. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1365-1374, 2017.

SANTIN, D. **Produtividade, teor de minerais, cafeína e Teobromina em erva-mate adensada e adubada quimicamente**. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/14539>. Acesso em: 18 abr. 2019.

SANTIN, D.; BENEDETTI, E. L.; BARROS, N. F. DE; ALMEIDA, I. C. DE; SIMIQUELI, G. F.; NEVES, J. C. L.; WENDLING, I.; REISSMANN, C. B. Adubação nitrogenada e intervalos de colheita na produtividade e nutrição da erva-mate e em frações de carbono e nitrogênio do solo. **Ciência Florestal**, v.29, n.3, p.1199-1214, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509810843>. Acesso em: 18 agost. 2020.

SANTIN, D.; BENEDETTI, E.L.; BARROS, N.F.; FONTES, L.L.; ALMEIDA, I.C.; NEVES, J.C.L.; WENDLING, I. Manejo de colheita e adubação fosfatada na cultura da erva-mate (*Ilex paraguariensis*) em fase de produção. **Ciência Florestal**, v.27, p.783-797, 2017.

SANTIN, D.S.; BENEDETTI, E.L.; BARROS, N.F.; ALMEIDA, I.C.; LEAL, G.P.; FONTES, L.; NEVES, J.C.L.; WENDLING, I.; REISSMANM, C.B. Effect of potassium fertilization on yield and nutrition of yerba mate (*Ilex paraguariensis*). **R. Bras. Ci. Solo**, v.38, p.1469-1477, 2014.

SANTIN, D.S.; BENEDETTI, E.L.; BASTOS, M.C.; KASEKER, J.F.; REISSMANM, C.B.; BRONDANI, G.E.; BARROS, N. F. Crescimento e nutrição de erva-mate influenciados pela adubação nitrogenada, fosfatada e potássica. **Ciência Florestal**, v.23, p.363-375, 2013.

SARRIA, B.; MARTINEZ-LOPEZ, S.; GARCÍA-CORDERO, J.; GONZALEZ-RAMILA, S.; MATEOS, R.; BRAVO, L. Yerba mate may prevent diabetes according to a crossover, randomized, controlled study in humans. **Proceedings of the Nutrition**



**Society**, v. 79(OCE2), E245, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1017/S0029665120001937>. Acesso em: 20 jan. 2021.

SCHERER, R.; URFER, P.; MAYOL, M.R.; BELINGHERI, L.D.; MARX, F.; JANSSENS, M.J.J. Inheritance studies of caffeine and theobromine content of Mate (*Ilex paraguariensis*) in Misiones, Argentina. **Euphytica**, v. 126, p. 203–210, 2002.

SCHMIDT, M.; TORN, M.; ABIVEN, S.; DITTMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I.A.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; MANNING, D.A.C.; NANNIPIERI, P.; RASSE, D.P.; WINER, S.; TRUMBORE, S.E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, v. 478, p. 49–56, 2011. Disponível em: <http://doi-org.ez103.periodicos.capes.gov.br/10.1038/nature10386>. Acesso em: 11 out. 2019.

SCHUBERT, A.; ZANIN, F.F.; PEREIRA, D.F.; ATHAYDE, M.L. Variação anual de metilxantinas totais em amostras de *Ilex paraguariensis* A. ST. – Hil. (erva-mate) em Ijuí e Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul. **Quim. Nova**, v.29, n. 6, p. 1233-1236, 2006.

SENTHILKUMAR, N.; MURUGESAN, S.; BABU, D.S. Secondary metabolites and nutrient balance in casuarinas: An insight into Protein Competition Model (PCM). **Journal of Advanced Laboratory Research in Biology**, v.5, p.107-111, 2014.

SOUZA, A.H.P.; CORRÊA, R.C.G.; BARROS, L.; CALHELHA, R.C.; SANTOS-BUELGA, C.; PERALTA, R.M.; BRACHT, A.; MATSUSHITA, M.; FERREIRA, I. C.F.R. Phytochemicals and bioactive properties of *Ilex paraguariensis*: Na in-vitro comparative study between the whole plant, leaves and stems. **Food Research International**, v. 78, p. 286–294, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.032>. Acesso em: 26 out 2019.

SUGIYAMA, A.; SANO, C.M.; YAZAKI, K.; SANO, H. Caffeine fostering of mycoparasitic fungi against Phytopathogens. **Plant Signaling & Behavior**, v. 11, n.1, e1113362, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/15592324.2015.1113362>. Acesso em: 8 jul. 2019.

THIRUMURUGAN, D.; CHOLARAJAN, A.; RAJA, S.; VIJAYAKUMAR, R. **An Introductory Chapter: Secondary Metabolites**, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.79766>. Acesso em: 2 out. 2019.

TOMASI, J. C. **Bioactive compounds of yerba mate according to genotype, nitrogen fertigation and drying methods and acceptance of mate tea by**

**consumers.** UFPR, 2020, 142f. Tese (Doutorado em Agronomia). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná, 2020. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/68949>. Acesso em: 2 fev. 2021.

VIEIRA, M.A.; MARASCHIN, M.; PAGLIOSA, C.M.; PODESTÁ, R.; DE SIMAS, K.N.; ROCKENBACH, I.I.; AMBONI, R.D.; AMANTE, E. R. Phenolic acids and methylxanthines composition and antioxidant properties of mate (*Ilex paraguariensis*) residue. **J Food Sci.** v.75, n.3, C280-5, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01548.x>. Acesso em: 18 mar. 2020.

WANG, J.; FU, B.; QIU, Y.; CHEN, L. Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semi-arid small catchment on the loess plateau in China. **Journal of Arid Environments**, v. 48, n.4, p.537-550, 2001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1006/jare.2000.0763>. Acesso em: 6 mar. 2019.

WENDLING, I.; STURION, J. A.; REIS, C. A. F.; STUEPP, C. A.; PEÑA, M. L. P. Indirect and expedite assessment of *Ilex paraguariensis* comercial yield. **Cerne**, v. 22, n.3, p. 241-248, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201622032189>. Acesso em: 20 agost. 2019.

YANG, Y.; WANG, F.; WAN, Q.; RUAN, J. Transcriptome analysis using RNA-Seq revealed the effects of nitrogen form on major secondary metabolite biosynthesis in tea (*Camellia sinensis*) plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 40, n.127, 2018. Disponível em: <http://doi.org/10.1007/s11738-018-2701-0>. Acesso em: 8 out. 2019.

ZAMPIER, C. **Avaliação dos níveis de nutrientes, cafeína e taninos após adubação mineral e orgânica, e sua relação com a produtividade na erva-mate (*Ilex paraguariensis* St Hil.).** 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/674?show=full>. Acesso em: 20 mar. 2019.

ZHANG, J.; YANG, Y.; ZHENG, K.; XIE1, M.; FENG, K.; JAWDY, S.S.; GUNTER, L.E.; RANJAN, P.; SINGAN, V. R.; ENGLE, N; LINDQUIST, E.; BARRY, K; SCHMUTZ, J.; ZHAO, N; TSCHAPLINSKI, T.J.; LEBOLDUS, J.; TUSKAN, G. A.; CHEN, J.G.; MUCHERO, W. Genome-wide association studies and expression-based quantitative trait loci analyses reveal roles of HCT2 in caffeoylquinic acid biosynthesis and its regulation by defense responsive transcription factors in *Populus*. **New Phytologist**, v. 220, p. 502–516, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/nph.15297>. Acesso em: 16 out. 2019.

ZIELINSKI, A. A. F.; ALBERTI, A.; BONA, E.; BORTOLINI, D. G.; BENVENUTTI, L.; BACH, F.; Demiate, I. M.; NOGUEIRA, A. A multivariate approach to differentiate yerba mate (*Ilex paraguariensis*) commercialized in the southern Brazil on the basis of phenolics, methylxanthines and in vitro antioxidant activity. **Food Science and Technology**, v. 40, n.3, p.645-652, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/fst.15919>. Acesso em: 20 jan. 2021.

#### **4 CONCLUSÃO GERAL**

Os teores de elementos disponíveis nos solos influenciaram a produção de matéria seca e teores de elementos nos tecidos da erva-mate, mas as correlações entre essas variáveis foram fracas, indicando que a plasticidade fisiológica da erva-mate é capaz de dar respostas distintas à cada composição química de solo. As respostas fisiológicas influenciaram e foram influenciadas pela interação de elementos no solo e na planta, levando à retroalimentação de processos com consequências de predição intrincada.

Os teores de ácidos cafeoilquínico entre as plantas cultivadas em diferentes solos foi similar; e para cafeína, distinta. No entanto, não foi possível identificar quais características químicas do solo influenciaram os resultados para o teor de cafeína em folhas maduras de erva-mate, devido à complexa interação fisiológica da planta com o meio.

#### **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O avanço nos conhecimentos da interação planta-solo para a erva-mate é de suma importância para aumentar a qualidade do produto, bem como para melhorar sua estratégia comercial, atingindo mais consumidores com produtos cada vez mais diferenciados, com melhor retorno financeiro aos produtores. Para tanto é essencial o aprofundamento em conhecimentos em fisiologia da erva-mate, especialmente ligadas ao segmento de “ionomics” - mecanismos moleculares básicos que direcionam a absorção e translocação de múltiplos elementos, bem como a interação entre eles.

## 6 REFERÊNCIAS

ABICHEQUER, A.D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **R. Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.21-26, 1998.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol. Z.**, v.22, n.6, p.711–728, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 01 mar. 2018.

AMARAL, F.H.C.; NETO, A.E.F.; CURI, N.; INDA, A.V.; ARAÚJO, E.F. Produtividade de *Eucalyptus grandis* e sua relação com a cinética de liberação de macronutrientes Productivity of *Eucalyptus grandis* and its relationship with the macronutrients release kinetics. **Sci. For.**, v.43, p.979-991, 2015.

ANDA, M. Cation imbalance and heavy metal content of seven Indonesian soils as affected by elemental compositions of parent rocks. **Geoderma**, v.189–190, p.388–396, 2012.

ANESINI, C.; TURNER, S.; COGOI, L.; FILIP, R. Study of the participation of caffeine and polyphenols on the overall antioxidante activity of mate (*Ilex paraguariensis*). **Food Science and Technology**, v. 45, 299e304, 2012.

ARTUR, A.G.; OLIVEIRA, D.P.; COSTA, M. C.; ROMERO, R.E.; SILVA, M.V.C.; FERREIRA, T.O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.2, p.141-149, 2014.

BADRI, D.V.; VIVANCO, J.M. Regulation and function of root exudates. **Plant Cell Environ.**, v.32, p.666–681, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.01926.x>. Acesso em: 15 nov. 2019.

BAQUY, M. A., LI, J.Y., SHI, R.Y.; KAMRAN, A.; XU, R.K. Higher cation exchange capacity determined lower critical soil pH and higher Al concentration for soybean. **Environ Sci Pollut Res**, v. 25, p. 6980–6989, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1014-y>. Acesso em: 8 agost. 2019.

BARAN, A.; GRUSZECKA-KOSOWSKA, A.; KOŁTON, A., JASIEWICZ, C.; PIWOWAR, P. Content and health risk assessment of selected elements in the Yerba mate (*Ilex paraguariensis*, St. hillaire). **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v.24, p. 1092-1114, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10807039.2017.1406304>. Acesso em: 20 out. 2019.

BARBOSA, J.Z., MOTTA, A.C.V., DOS REIS, A.R.; CORREIA, R.S.; PRIOR, S.A. Spatial distribution of structural elements in leaves of *Ilex paraguariensis*: physiological and ecological implications. **Trees**, v.34, p.101–110, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01900-y>. Acesso em: 29 jan. 2021.

BARBOSA, J.Z.; MOTTA, A.C.V.; CONSALTER, R.; POGGERE, G.; SANTIN, D.; WENDLING, I. Plant growth, nutrients and potentially toxic elements in leaves of yerba mate clones in response to phosphorus in acid soils. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.90, p. 557-571, 2018.

BASTOS, M.C.; CHEROBIM, V.F.; REISSMANN, B.; KASEKER, J.F.; GAIAD, S. Yerba mate: nutrient levels and quality of the beverage depending on the harvest season. **Journal of food composition and analysis**, v.69, p.1-6, 2018.

BELLOTE, A. F.; STURION, J. A. (1985) **Deficiências minerais em erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.): resultados preliminares**. In: SEMINÁRIO SOBRE ATUALIDADES E PERSPECTIVAS FLORESTAIS, 10., 1983, Curitiba. Silvicultura da erva-mate. Curitiba, 1985. p. 124-128.

BERTÉ, K. A. S.; IZIDORO, D. R.; DUTRA, F. L. G.; HOFFMANN-RIBANI, R. Desenvolvimento de gelatina funcional de erva-mate. **Ciência Rural**, v.41, n.2, p.354-360, 2011a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782011000200029>. Acesso em: 26 mar. 2019.

BERTÉ, K.A.S.; BEUX, M.R.; SPADA, P.K.W.D.S.; SALVADOR, M.; HOFFMANN-RIBANI, R. Chemical Composition and Antioxidant Activity of Yerba-Mate (*Ilex paraguariensis* A.St.-Hil., Aquifoliaceae) Extract as Obtained by Spray Drying. **J. Agric. Food Chem.**, v.59, p.5523–5527, 2011b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/jf2008343>. Acesso em: 04 abr. 2019.

BERTÉ, K.A.S. **Tecnologia da erva-mate solúvel**. 160 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/26312>. Acesso em: 16 fev. 2019.

BORGES, R.; BOFF, M.I.C.; MANTOVANI, A.; RADOMSKI, M.I. Effect of cover on the development and production of secondary compounds of *Maytenus ilicifolia* and *Ilex paraguariensis* in agroforestry systems. **Ci. FI.**, v. 29, n. 4, p. 1630-1643, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832280>. Acesso em: agost. 2020.

BRACESCO, N.; SANCHEZ, A.G.; CONTRETAS, V.; MENINI, T.; GUGLIUCCI, A. Recent advances on *Ilex paraguariensis* research: Minireview. **Journal of Ethnopharmacology**, v.136, p.378-384, 2011.

BRAGANÇA, V.L.C.; MELNIKOV, P.; ZANONI, L.Z. Trace Elements in Different Brands of Yerba Mate Tea. **Biol Trace Elem Res**, v.144, p.1197–1204, 2011.

BRAXTER, I.R.; VITEK, O.; LAHNER, B.; MUTHUKUMAR, B.; BORGHI, M.; MORRISSEY, J.; GURINOT, M.L.; SALT, D.E. The leaf ionome as a multivariable system to detect a plant's physiological status. **PNAS**, v.105, p.12081-12086, 2008.

BURGHELEA, C. I.; DONTSOVA, K.; ZAHARESCU, D.G.; MAIER, R. M.; HUXMAN, T.; AMISTADI, M. K.; HUNT, E.; CHOROVER, J. Trace element mobilization during incipient bioweathering of four rock types. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 234, p. 98-114, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.05.011>. Acesso em: 7 agost. 2020.

BUTIUK, A.P.; MARTOS, M.A; ADACHI, O.; HOURS R.A. Study of the chlorogenic acid content in yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.): Effect of plant fraction, processing step and harvesting season. **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**, v. 3, p. 27–33, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jarmap.2015.12.003>. Acesso em: 15 out 2019.

CANARINI, A.; MERCHANT, A.; RICHTER, A.; WANEK, W. Root exudation of primary metabolites: mechanisms and their roles in plant responses to environmental stimuli. **Frontiers in Plant Science**, v.10, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2019.00157>. Acesso em: 05 out. 2020.

CANIZA, D.A.A.; TURATTI, A.M.; FERNANDES, F.; DIAS, J.F.; SANTOS, C.E.L. Cheochemical markers of *Ilex paraguariensis* determined by PIXE. **Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B**, v.477, p.163–168, 2020.

CANTARELLA, H; ANDRADE, C. A.; MATTOS JÚNIOR, D. Matéria orgânica do solo e disponibilidade de N as plantas. In: SANTOS, G. A. et al. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 581-595.

CAO, X.; CHEN, Y.; WANG, X.; DENG, X. Effect of redox potential and pH value on the release of rare Earth elements from soil. **Chemosphere**, v.44, p.655-661, 2001.

CARDOZO JUNIOR, E.L.; DONADUZZI, C.M.; FERRARESE-FILHO, O.; FRIEDRICH, J. C.; GONELA, A.; STURION, J. A. Quantitative genetic analysis of methylxanthines and phenolic compounds in mate progênies. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.45, n.2, p.171-177, fev. 2010.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: EMBRAPA informação Tecnológica; Colombo: EMBRAPA/Florestas, v.1. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras). 2003.

CÁSSIA-SILVA, C.; CIANCIARUSO, M.V.; MARACAHIPES, L.; COLLEVATTI, R.G. When the same is not the same: phenotypic variation reveals diferente plant ecological strategies within species occurring in distinct Neotropical savana habitats. **Plant Ecol**, v.218, p.1221-1231, 2017.

COELHO, G.C.; RACHWAL, M.F.G.; DEDECEK, R.A.; CURCIO, G.R.; NIETSCHKE, K.; SCHENKEL, E.P. Effect of light intensity on methylxanthine contents of *Ilex paraguariensis* A. St. Hil. **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 35, 75e80, 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bse.2006.09.001>. Acesso em: 30 mar. 2019.

CROGE, C. P.; CUQUEL, F. L.; PINTRO, P. T. M. Yerba mate: cultivation systems, processing and chemical composition. A review. **Scientia Agricola**, v. 78, n.5, e20190259, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0259>. Acesso em: 10 fev. 2021.

CROGE, C.P.; CUQUEL, F.L.; PINTRO, P.T.M. Yerba mate: cultivation systems, processing and chemical composition. A review. **Scientia Agricola**, 78: e20190259, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0259>. Acesso em: 02 fev. 2021.

DAOU, L.; SHIPLEY, B. The measurement and quantification of generalized gradients of soil fertility relevant to plant community ecology. **Ecology**, v.100, n.1, e02549, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/ecy.2549>. Acesso em: 21 set. 2020.



DARTORA, N.; DE SOUZA, L.M.; SANTANA-FILHO, A.P.; IACOMINI, M.; VALDUGA, A.T.; GORIN, P.A.J.; SASSAKI, G.L. UPLC-PDA-MS evaluation of bioactive compounds from leaves of *Ilex paraguariensis* with different growth conditions, treatments and ageing. **Food Chemistry**, v. 129, n.4, p.1453-1461, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.05.112>. Acesso em: 19 mar. 2019.

DUCAT, G.; QUINÁIA, S.P. Avaliação do teor de minerais da *Ilex paraguariensis* da região Centro-Oeste do Estado do Paraná. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 6, n. 1, 2004.

FIFE, D.N.; NAMBIAR, E.K.S.; SAUR, E. Retranslocation of foliar nutrients in evergreen tree species planted in a Mediterranean environment. **Tree Physiology**, v.28, p.187-196, 2008.

FOLTRAN, E.C.; ROCHA, J.H.T.; BAZANI, J.H.; GONÇALVES, J.L.M.; RODRIGUES, M.; PAVINATO, P.; VALDUGA, G.R.; ERRO, J.; GARCIA-MINA, J.M. Phosphorus pool responses under different P inorganic fertilizers for a eucalyptus plantation in a loamy Oxisol. **Forest Ecology and Management**, v.435, p.170-179, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.053>. Acesso em: 25 abr. 2020.

GALHARDI, J.A.; LELES, B.P.; DE MELLO, J.W.V.; WILKINSON, K. J. Bioavailability of trace metals and rare earth elements (REE) from the tropical soils of a coal mining area. **Science of The Total Environment**, v. 717, 134484, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134484>. Acesso em: 13 jan. 2021.

GARDI, C.; ANGELINI, M.; BARCELÓ, S.; COMERMA, J.; CRUZ GAISTARDO, C.; ENCINA ROJAS, A.; JONES, A.; KRASILNIKOV, P.; MENDONÇA- SANTOS, M.L.; MONTANARELLA, L.; MUNIZ UGARTE, O.; SCHAD, P.; VARA RODRÍGUEZ, M.I.; VARGAS, R.; RAVINA DA SILVA, M. (eds), 2015. **Atlas de solos de América Latina e do Caribe**, Comissão Europeia – Serviço das Publicações da União Europeia, L-2995 Luxembourg, 176 pp.

GAYLER, S.; GRAMS, T.E.E.; HELLER, W.; TREUTTER, D.; PRIESACK, E. A Dynamical Model of Environmental Effects on Allocation to Carbon-based Secondary Compounds in Juvenile Trees. **Annals of Botany**, v. 101, p. 1089–1098, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcm169>. Acesso em: 28 mar. 2019.

GERHARDT, M. Colonos ervateiros: História ambiental e imigração no Rio Grande do Sul. **Revista Esboços**, v.18, p.73-95, 2011.

GERKE, I. B.B.; HAMERSKI, F.; SCHEER, A.; SILVA, V. Solid-liquid extraction of bioactive compounds from yerba mate (*Ilex paraguariensis*) leaves: Experimental study, kinetics and modeling. **Journal of Food Process Engineering**, v. 41, e12892, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/jfpe.12892>. Acesso em: 30 mar. 2019.

GERKE, I.B.B.; HARMERSKI, F.; SCHEEFER, A.P.; SILVA, V.R. Solid-liquid extraction of bioactive compounds from yerba mate (*Ilex paraguariensis*) leaves: Experimental study, kinetics and modeling. **Journal of Food Process Engineering**, v.41, e12892, 2018.

GIORGI A.; MINGOZZI M.; MADEO M.; SPERANZA G.; COCUCCI M. Effect of nitrogen starvation on the phenolic metabolism and antioxidant properties of yarrow (*Achillea collina* Becker ex Rchb.). **Food Chemistry**, v.114, n.1, p.204-211, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.039>. Acesso em: 14 abr. 2019.

GIULIAN, R.; SANTOS, C.E.I.; SHUBEITA, S.M.; SILVA, L.M.; YONEAMA, M.L.; DIAS, J.F. The study of the influence of industrial processing on the elemental composition of mate tealeaves (*Ilex paraguariensis*) using the PIXE technique. **Food Science and Technology**, v.42, p.74–80, 2009.

GOBBO-NETO, L.; LOPES, N.P. Plantas medicinais: fatores de influência no conteúdo de metabólitos secundários. **Quim. Nova**, v.30, n.2, p.374-381, 2007.

GRUBA, P.; MULDER, J. Tree species affect cation Exchange capacity (CEC) and cation binding properties of organic matter in acid forest soils. **Science of the total environment**, v.511, p.655-662, 2015.

HARIDASAN, M. Nutritional adaptations of native plants of the cerrado biome in acid soils. **Braz. J. Plant Physiol.**, v.20, p.183-195, 2008.

HARPOLE, W.S.; NGAI, J.T.; CLELAND, E.E.; SEABLOOM, E.W.; BORER, E.T.; BRACKEN, M.E.S.; ELSE, J.J.; GRUNER, D.S.; HILLEBRAND, H.; SHURIN, J.B.; SMITH, J. Nutrient co-limitation of primary producer communities. **Ecology Letters**, v.14, p.852-862, 2011.

HAUKIOJA, E.; OSSIPOV, V.; KORICHEVA, J.; HONKANEN, T.; LARSSON, S.; LEMPA, K. Biosynthetic origin of carbon-based secondary compounds: cause of variable responses of woody plants to fertilization? **Chemoecology**, v. 8, p.133–139, 1998.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

ISAH, T. Stress and defense responses in plant secondary metabolites production. **Biol Res**, v. 52, n.39, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40659-019-0246-3>. Acesso em: 17 out 2020.

ISOLABELLA, S.; COGOI, L.; LÓPEZ, P.; ANESINI, C.; FERRARO, G.; FILIP, R. Study of the bioactive compounds variation during yerba mate (*Ilex paraguariensis*) processing. **Food Chemistry**, v. 122, n.3, p.695-699, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.039>. Acesso em: 26 set. 2019.

JACKSON, T.A. Weathering, secondary mineral genesis, and soil formation caused by lichens and mosses growing on granitic gneiss in a boreal forest environment. **Geoderma**, v.251–252, p.78-91, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.012>. Acesso em: 10 mar. 2020.

JACQUES, R.A.; ARRUDA, E.J.; OLIVEIRA, L.C.S.; OLIVEIRA, A.P.; DARIVA, C.; OLIVEIRA, J.V.; CARAMA, E.B. Influence of Agronomic Variables on the Macronutrient and Micronutrient Contents and Thermal Behavior of Mate Tea Leaves (*Ilex paraguariensis*). **J. Agric. Food Chem.**, v.55, p. 7510-7516, 2007.

KAJALA, K.; WALKER, K.L.; MITCHELL, G.S.; KRÄMER, U.; CHERRY, S.R. Real-time whole-plant dynamics of heavy metal transport in *Arabidopsis halleri* and *Arabidopsis thaliana* by gamma-ray imaging. **Plant Direct**, v.3, n.4, e00131, 2019.

KARPINSKA J.; ŚWISŁOCKA R.; LEWANDOWSKI W. A mystery of a cup of coffee; an insight look by chemist. **Biofactors**, v.43, n.5, p.621-632, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/biof.1371>. Acesso em: 5 nov. 2019.

KATERINOPOULOU, K.; KONTOGEORGOS, A.S.; CONSTANTINOS, P.; ANGELOS, L.A. Geographical Origin Authentication of Agri-Food Products: A Review. **Foods**, v.9, p. 489, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/foods9040489>. Acesso em: 19 dez. 2020.

KRÄMER, U. Metal hyperaccumulation in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 61, p.517-534, 2010.

KUMMER, L.; MELO, V.F.; BARROS, Y.J.; AZEVEDO, J.C.R. Extrações sequenciais de chumbo e zinco em solos de área de mineração e metalurgia de metais pesados. **Rev. Bras. Ciênc. Solo.**, v.35, p.2005-2018, 2011.

LAMBERS, H.; BRUNDRETT, M.C.; RAVE, J.A.; HOPPER, S.D. Plant mineral nutrition in ancient landscapes: high plant species diversity on infertile soils is linked to functional diversity for nutritional strategies. **Plant Soil**, v.348, p.7-27, 2011.

LI, L.; WEN, B.; ZHANG, X.; ZHAO, Y.; DUAN, Y.; SONG, X.; REN, S.; WANG, Y.; FRANG, W.; ZHU, X. Geographical origin traceability of tea based on multi-element spatial distribution and the relationship with soil in district scale. **Food Control**, v.90, p.18e28, 2018.

LIMA, J. P.; FARAH, A.; KING, B.; DE PAULIS, T.; MARTIN, P. R. Distribution of Major Chlorogenic Acids and Related Compounds in Brazilian Green and Toasted *Ilex paraguariensis* (Maté) Leaves. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.64, n.11, p.2361-2370, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00276>. Acesso em: 28 nov. 2019.

LIMA, J.P.; FARAH, A.; KING, B.; PAULIS, T.; MARTIN, P.R. Distriution of Major Chlorogenic Acids and Related Compounds in Brasilian Green and Toasted *Ilex paraguariensis* (Maté) Leaves. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.64, p.2361-2370, 2016.

LIU, D.; WANG, H.; ZHANG, Y.; ZHANG, Z. Protective Effects of Chlorogenic Acid on Cerebral Ischemia/Reperfusion Injury Rats by Regulating Oxidative Stress-Related Nrf2 Pathway. **Drug Des Devel Ther.**, v.7, n.14, p.51-60, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2147/DDDT.S228751>. Acesso em: 25 jan. 2021.

LÓPEZ-RAYO, S.; LUCENA, S.; LUCENA, J.J. Chemical properties and reactivity of manganese chelates and complexes in solution and soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.177, p.189-198, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.201300091>. Acesso em: 25 dez. 2018.

LOURENÇO, R.S.; CURCIO, G.R.; RACHWAL, M.G.; MEDRADO, M.J.S. Avaliação de níveis de nitrogênio sobre a produção de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) em Fernandes Pinheiro, PR, em Latossolo Vermelho Escuro. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.34, p.75-98, 1997.

LUTOMSKI, P.; GOŹDZIEWSKA, M.; FLOREK-ŁUSZCZKI, M. Health properties of Yerba Mate. **Ann Agric Environ Med.**, v. 27, n. 2, p.310-313, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.26444/aaem/119994>. Acesso em: 16 jan. 2021.

MA, L.; JON, L.; BRANTLEY, S. L. How mineralogy and slope aspect affect REE release and fractionation during shale weathering in the Susquehanna/Shale Hills Critical Zone Observatory. **Chemical Geology**, v. 290, n.1–2, 2011, p.31-49, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.08.013>. Acesso em: 03 jan. 2021.

MAACK, R. 2012. **Geografia física do Estado do Paraná**. 4 ed. Ponta Grossa, Editora UEPG.

MAGRI, E.; GUGELMIN, E.K.; GRABARSKI, F.A.P.; BARBOSA, J.Z.; AULER, A.C.; WENDLING, I.; PRIORF, A.S.; VALDUGA, A.T.; MOTTA, C.V. Manganese hyperaccumulation capacity of *Ilex paraguariensis* A. St. Hil. and occurrence of interveinal chlorosis induced by transient toxicity. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.203, 111010, 2020.

MARCELO, M.C.A.; MARTINS, C.A.; POZEBON, D.; DRESSLER, V.L.; FERRÃO, M.F. Classification of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) according to the country of origin based on element concentrations. **Microchemical Journal**, v.117, p.164–171, 2014.

MARQUES, V.; FARAH, A. Chlorogenic acids and related compounds in medicinal plants and infusions. **Food Chemistry**, v. 113, p. 1370–1376, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.086>. Acesso em: 23 out 2019.

MÁRQUEZ, V.; MARTÍNEZ, N.; GERRA, M.; FARIÑA, L.; BOIDO, E.; DELLACASSA, E. Characterization of aroma-impact compounds in yerba mate (*Ilex paraguariensis*) using GC-olfactometry and GC-MS. **Food Research International**, v.53, p.808-815, 2013.

MELO, V.F.; CASTILHOS, R.M.V.; PINTO, L.F.S. (2016) Reserva mineral do solo. In: Melo VF and Alleoni LR (ed) **Química e mineralogia do solo**, 1rd, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p.252-332

MILANI, R.F.; SILVESTRE, L.K.; MORGANO, M.A.; CADORE, S. Investigation of twelve trace elements in herbal tea commercialized in Brazil. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v.52, p.111–117, 2019.

MILLALEO, R.; REYES-DIAZ, M.; IVANOV, A.G.; MORA, M.L.; ALBERDI, M. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance. **Journal of soil science and plant nutrition**, v.10, p. 470-481, 2010. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>. Acesso em: 15 ago. 2019

MORALES-RAMOS, V.; ESCAMILLA-PRADO, E.; RUIZ-CARBAJAL, R. A.; PÉREZ-SATO, J. A.; VELÁZQUEZ-MORALES, J.A.; SERVÍN-JUÁREZ, R. On the soil-bean-cup relationships in *Coffea arabica* L. **J Sci Food Agric**, v. 100, p. 5434–5441, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.10594>. Acesso em: 10 jan. 2021.

MOTTA, A.C.V.; BARBOSA, J.Z.; MAGRI, E.; PEREIRA, G.Q.; SANTIN, D.; PRIOR, S.A.; CONSALTER, R.; YOUNG, S.D.; BROADLEY, M.R.; BENEDETTI, E.L. Elemental composition of yerba mate (*Ilex paraguariensis* A.St.-Hil.) under low input systems of southern Brazil. **Science of the Total Environment**, v.736, 139637, 2020.

MURAKAMI, A. N. N.; AMBONI, R.D.M.C.; PRUDÊNCIO, E.S.; AMANTE, E.R.; FRITZEN-FREIRE, C.B.; BOAVENTURA, B. C. B.; I.B.; BRANCO, C.S.; SALVADOR, M.; MARASCHIN, M. Concentration of biologically active compounds extracted from *Ilex paraguariensis* St. Hil. by nanofiltration. **Food Chemistry**, v. 141, n.1, p. 60-65, 2013.

NI, K.; WANG, J.; ZHANG, Q.; YI, X.; MA, L.; SHI, Y.; RUAN, J. Multi-element composition and isotopic signatures for the geographical origin discrimination of green tea in China: A case study of Xihu Longjing. **Journal of Food Composition and Analysis**, v.67, p.104–109, 2018.

NITAO, J.K.; ZANGERL, A.R.; BERENBAUM, M.R. CNB: requiescat in pace? **OIKOS**, v. 98, n.3, p. 540-546, 2002.

OLIVA, E.V.; REISSANN, C.B.; GAIAD, S.; OLIVEIRA, E.B.; STURION, J.A. Composição nutricional de procedência e progenies de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) cultivadas em Latossolo Vermelho Distrófico. **Ciência Florestal**, v.24, p.793-805, 2014.

OLIVARI, I.; PAZ, S.; GUTIÉRREZ, A.J.; GONZÁLEZ-WELLER, D.; HARDISSON, A.; SAGRATINI, G.; RUBIO, C. Macroelement, trace element, and toxic metal levels in leaves and infusions of yerba mate (*Ilex paraguariensis*). **Environmental Science and Pollution Research**, v.27, p.21341–21352, 2020.

OLIVEIRA, Y.M.M.; ROTTA, E. Área de distribuição natural de erva mate. In: SEMINÁRIO SOBRE ATUALIDADES E PERSPECTIVAS FLORESTAIS: SILVICULTURA DA ERVA-MATE, 10., 1983, Curitiba. Anais. Curitiba: URPFCs, 1983. p. 17-35. (**EMBRAPA-URPFCS. Documentos, 25**).

ONWEREMADU, E.U. Availability of Selected Soil Nutrients in Relation to Land Use and Landscape Position. **International Journal of Soil Science**, v. 2, p.128-134, 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3923/ijss.2007.128.134>. Acesso em: 13 out. 2019.

PATZEL, N.; STICHER, H.; KARLEN, D.L. Soil Fertility — Phenomenon and Concept. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.163, p.129-142, 2000.

PÉDROT, M.; DIA, A.; DAVRANCHE, M. Dynamic structure of humic substances: rare earth elements as a fingerprint. **J Colloid Interface Sci.**, v.345, n.2, p.206-13, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2010.01.069>. Acesso em: 21 de jan. 2019.

PENG, L.; SHI, Z.; WANG, P.; LI, Z.; DANG, Z.; SPARKS, D.L. A novel multi-reaction model for kinetics of Zn release from soils: Roles of soil binding sites. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.514, p.146-155, 2018.

PITA-BARABOSA, A.; RICACHENEVSKY, F.K.; FLIS, P.M. One “OMICS” to integrate them all: ionomics as a result of plant genetics, physiology and evolution. **Theor. Exp. Plant Physiol.**, v.31, p.71–89, 2019. **LANT**

POZEBON, D.; DRESSLERB, V.L.; MARCELO, M.C.A.; OLIVEIRA, T.C.; FERRÃO, M.F. Toxic and nutrient elements in yerba mate (*Ilex paraguariensis*). **Food Additives & Contaminants: Part B**, v.8, p.215–220, 2015.

QIAO, C.; XU, B.; HAN, Y.; WANG, J.; WANG, X.; LIU, L.; LIU, W.; WANG, S.; TAN, H.; LIU, Y.; ZHAO, X. Synthetic nitrogen fertilizers alter the soil chemistry, production and quality of tea. A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v.38, n. 10, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-017-0485-z>. Acesso em: 14 agost. 2019.

R CORE TEAM (2017) **R: a language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.



RABEL, D.O.; MOTTA, A.C.V.; BARBORA, J.Z.; MELLO, V.F.; PRIOR, A.S. Depth distribution of exchangeable aluminum in acid soils: A study from subtropical Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.40, e39320, 2018.

RIACHI, L. G.; SIMAS, D.L.R; COELHO, G.C.; MARCELLINI, P.S.; SILVA, A.J.R.; MARIA, C. A. B. Effect of light intensity and processing conditions on bioactive compounds in maté extracted from yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.). **Food Chemistry**, v. 266, p. 317–322, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.028>. Acesso em: 04 fev. 2020.

RICARDI, A. C.; KOSZALKA, V.; LOPES, C.; WATZLAWICK, L. F.; BEN, T. J.; UMBURANAS, R. C.; MULLER, M. M. L. Aluminum improves the growth and quality of yerba mate (*Ilex paraguariensis*, Aquifoliaceae) clonal seedlings. **Society and Development**, v. 9, n. 10, p. e419108064, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8064>. Acesso em: 9 jan. 2021.

ROSSA, U. B. **Produtividade e compostos foliares de erva-mate sob efeitos de luminosidade e fertilização**. UFPR, 2013, 208f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/32260>. Acesso em: 20 abr. 2019.

ROSSA, U.B.; CAMARGO, A.; MAZUCHOWSKI, A.J.Z.; WESTPHALEN, D.J.; FRIZON, C.N.T.; MARTINS, C.E.N. Influence of light and fertilizer on methylxantines and phenolic compound in leaves of mate tea. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1365-1374, 2017.

SAIDELLES, F.L.; REINERT, D.J.; SALET, R.L. Initial growth of “Erva-mate” (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) seedlings in three soil types in central region of Rio Grande do Sul State. **Ciência Florestal**, v.13, p.17-25, 2003.

SANTIN, D. **Produtividade, teor de minerais, cafeína e Teobromina em erva-mate adensada e adubada quimicamente**. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/14539>. Acesso em: 18 abr. 2019.

SANTIN, D.; BENEDETTI, E. L.; BARROS, N. F. DE; ALMEIDA, I. C. DE; SIMIQUELI, G. F.; NEVES, J. C. L.; WENDLING, I.; REISSMANN, C. B. Adubação nitrogenada e intervalos de colheita na produtividade e nutrição da erva-mate e em frações de carbono e nitrogênio do solo. **Ciência Florestal**, v.29, n.3, p.1199-1214,



2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509810843>. Acesso em: 18 agost. 2020.

SANTIN, D.; BENEDETTI, E.L.; BARROS, N.F.; FONTES, L.L.; ALMEIDA, I.C.; NEVES, J.C.L.; WENDLING, I. Manejo de colheita e adubação fosfatada na cultura da erva-mate (*Ilex paraguariensis*) em fase de produção. **Ciência Florestal**, v.27, p.783-797, 2017.

SANTIN, D.S.; BENEDETTI, E.L.; BARROS, N.F.; ALMEIDA, I.C.; LEAL, G.P.; FONTES, L.; NEVES, J.C.L.; WENDLING, I.; REISSMANM, C.B. Effect of potassium fertilization on yield and nutrition of yerba mate (*Ilex paraguariensis*). **R. Bras. Ci. Solo**, v.38, p.1469-1477, 2014.

SANTIN, D.S.; BENEDETTI, E.L.; BARROS, N.F.; ALMEIDA, I.C.; SIMIQUELI, G.F.; NEVES, J.C.L.; WENDLING, I.; REISSMANN, C.B. Nitrogen fertilization and harvesting intervals affect yerba mate productivity and the nitrogen and carbon of **Soil. Ci. Fl.**, v.29, p.1199-1214, 2019.

SANTIN, D.S.; BENEDETTI, E.L.; BARROS, N.F.; FONTES, L.L.; ALMEIDA, I.C.; NEVES, J.C.L.; WENDLING, I. Manejo de colheita e adubação fosfatada na cultura da erva-mate (*Ilex paraguariensis*) em fase de produção. **Ciência Florestal**, v.27, p.783-797, 2017.

SANTIN, D.S.; BENEDETTI, E.L.; BASTOS, M.C.; KASEKER, J.F.; REISSMANN, C.B.; BRONDANI, G.E.; BARROS, N.F. Growth and nutritional composition of erva-mate as affected by nitrogen, phosphate and potassium fertilization. **Ciência Florestal**, v.23, p.363-375, 2013.

SANTIN, D.S.; BENEDETTI, E.L.; BASTOS, M.C.; KASEKER, J.F.; REISSMANM, C.B.; BRONDANI, G.E.; BARROS, N.F. Crescimento e nutrição de erva-mate influenciados pela adubação nitrogenada, fosfatada e potássica. **Ciência Florestal**, v.23, p.363-375, 2013.

SANTIN, D.S.; BENEDETTI, E.L.; BASTOS, M.C.; KASEKER, J.F.; REISSMANM, C.B.; BRONDANI, G.E.; BARROS, N. F. Crescimento e nutrição de erva-mate influenciados pela adubação nitrogenada, fosfatada e potássica. **Ciência Florestal**, v.23, p.363-375, 2013.

SARRIA, B.; MARTINEZ-LOPEZ, S.; GARCÍA-CORDERO, J.; GONZALEZ-RAMILA, S.; MATEOS, R.; BRAVO, L. Yerba mate may prevent diabetes according to a crossover, randomized, controlled study in humans. **Proceedings of the Nutrition**

**Society**, v. 79(OCE2), E245, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1017/S0029665120001937>. Acesso em: 20 jan. 2021.

SCHERER, R.; URFER, P.; MAYOL, M.R.; BELINGHERI, L.D.; MARX, F.; JANSSENS, M.J.J. Inheritance studies of caffeine and theobromine content of Mate (*Ilex paraguariensis*) in Misiones, Argentina. **Euphytica**, v. 126, p. 203–210, 2002.

SCHMIDT, M.; TORN, M.; ABIVEN, S.; DITTMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I.A.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; MANNING, D.A.C.; NANNIPIERI, P.; RASSE, D.P.; WINER, S.; TRUMBORE, S.E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, v. 478, p. 49–56, 2011. Disponível em: <http://doi-org.ez103.periodicos.capes.gov.br/10.1038/nature10386>. Acesso em: 11 out. 2019.

SCHUBERT, A.; ZANIN, F.F.; PEREIRA, D.F.; ATHAYDE, M.L. Variação anual de metilxantinas totais em amostras de *Ilex paraguariensis* A. ST. – Hil. (erva-mate) em Ijuí e Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul. **Quim. Nova**, v.29, n. 6, p. 1233-1236, 2006.

SENTHILKUMAR, N.; MURUGESAN, S.; BABU, D.S. Secondary metabolites and nutrient balance in casuarinas: An insight into Protein Competition Model (PCM). **Journal of Advanced Laboratory Research in Biology**, v.5, p.107-111, 2014.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, W.; ZHANG, F. Phosphorus dynamics: From soil to plant. **Plant Physiology**, v.156, p.997-1005, 2011.

SMOLDERS, E.; WAGNER, S.; PROHASKA, T.; IRRGEHER, J.; SANTNER, J. Sub-millimeter distribution of labile trace element fluxes in the rhizosphere explains differential effects of soil liming on cadmium and zinc uptake in maize. **Science of The Total Environment**, v.738, 140311, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140311>. Acesso em: 10 jan. 2021.

SOUZA, A.H.P.; CORRÊA, R.C.G.; BARROS, L.; CALHELHA, R.C.; SANTOS-BUELGA, C.; PERALTA, R.M.; BRACHT, A.; MATSUSHITA, M.; FERREIRA, I. C.F.R. Phytochemicals and bioactive properties of *Ilex paraguariensis*: Na in-vitro comparative study between the whole plant, leaves and stems. **Food Research International**, v. 78, p. 286–294, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.032>. Acesso em: 26 out 2019.

SUGIYAMA, A.; SANO, C.M.; YAZAKI, K.; SANO, H. Caffeine fostering of mycoparasitic fungi against Phytopathogens. **Plant Signaling & Behavior**, v. 11, n.1, e1113362, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/15592324.2015.1113362>. Acesso em: 8 jul. 2019.

SUN, L.; YANG, J.; FANG, H.; XU, C.; PENG, C.; HUANG, H.; LU, L.; DUAN, D.; ZHANG, X.; SHI, J. Mechanism study of sulfur fertilization mediating copper translocation and biotransformation in rice (*Oryza sativa* L.). **Environmental Pollution**, v.226, p.426-434, 2017.

TATSCH, F.R.P.; GONÇALVES, V.C.; MEURER, E.J. Alumínio total e solúvel em amostras de erva-mate comercializadas no Rio Grande do Sul. **Scientia Agraria**, v.11, p.83–86, 2010.

THIRUMURUGAN, D.; CHOLARAJAN, A.; RAJA, S.; VIJAYAKUMAR, R. **An Introductory Chapter: Secondary Metabolites**, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.79766>. Acesso em: 2 out. 2019.

TOMASI, J. C. **Bioactive compounds of yerba mate according to genotype, nitrogen fertigation and drying methods and acceptance of mate tea by consumers**. UFPR, 2020, 142f. Tese (Doutorado em Agronomia). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná, 2020. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/68949>. Acesso em: 2 fev. 2021.

TOPPEL, F.V.; JUNIOR, A.M.; MOTTA, A.C.; FRIGO, C.; MAGRI, E.; BARBOSA, J.Z. Soil chemical attributes and their influence on elemental composition of yerba mate leaves. **Floresta**, v.48, p.425-434, 2018.

VALDUGA, A.T.; GONÇALVES, I.L.; MAGRI, E. Analysis of the Presence of Toxic Metals in Yerba Mate Samples: a Case Study from South Brazil. **Water Air Soil Pollut**, v.230, 153, 2019.

VENTERINK, O. H. Productivity increase upon supply of multiple nutrients in fertilization experiments; co-limitation or chemical facilitation? **Plant and Soil**, v.408, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-016-3055-2>. Acesso em: 20 dez. 2018.

VIEIRA, M.A.; MARASCHIN, M.; PAGLIOSA, C.M.; PODESTÁ, R.; DE SIMAS, K.N.; ROCKENBACH, I.I.; AMBONI, R.D.; AMANTE, E. R. Phenolic acids and methylxanthines composition and antioxidant properties of mate (*Ilex paraguariensis*)

residue. **J Food Sci.** v.75, n.3, C280-5, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01548.x>. Acesso em: 18 mar. 2020.

WANG, H.; CHEN, W.; SINUMVAYABO, N.; LI, Y.; HAN, Z.; TIAN, J.; MA, Q.; PAN, Z.; GENG, Z.; YANG, S.; KANG, M.; RAHMAN, S.U.; YANG, G.; ZHANG, Y. Phosphorus deficiency induces root proliferation and Cd absorption but inhibits Cd tolerance and Cd translocation in roots of *Populus x euramericana*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.204, 111148, 2020a.

WANG, J.; FU, B.; QIU, Y.; CHEN, L. Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semi-arid small catchment on the loess plateau in China. **Journal of Arid Environments**, v. 48, n.4, p.537-550, 2001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1006/jare.2000.0763>. Acesso em: 6 mar. 2019.

WANG, Y.; LAMBERS, H. Root-released organic anions in response to low phosphorus availability: recente progress, challenges and future perspectives. **Plant Soil**, v.447, p.135-156, 2020.

WANG, Y.; WU, B.; BERNS, A.E.; XING, Y.; KUHN, A.J.; AMELUNG, W. Magnesium isotope fractionation reflects plant response to magnesium deficiency in magnesium uptake and allocation: a greenhouse study with wheat. **Plant Soil**, v.455, p. 93–105, 2020b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-020-04604-2>. Acesso em: 13 dez. 2020.

WANG, Z.A.; LI, Q.; GE, X.Y.; YANG, C.L.; LUO, X.L.; ZHANG, A.H.; XIAO, J.L.; TIAN, Y.C.; XIA, G.X.; CHEN, X.Y.; LI, F.G.; WU, J.H. The mitochondrial malate dehydrogenase 1 gene GhmMDH1 is involved in plant and root growth under phosphorus deficiency conditions in cotton. **Scientific Reports**, v.5,10343, 2015.

WENDLING, I.; STURION, J. A.; REIS, C. A. F.; STUEPP, C. A.; PEÑA, M. L. P. Indirect and expedite assessment of *Ilex paraguariensis* comercial yield. **Cerne**, v. 22, n.3, p. 241-248, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201622032189>. Acesso em: 20 agost. 2019.

WENDLING, I.; STURION, J.A.; REIS, C.A.F.; STUEPP, C.A.; PEÑA, M.L. Inderect and expedite assessment of *Ilex paraguariensis* comercial yield. **Cerne**, v.22, p.241-248, 2016.

WESTPHALEN, D.J.; ANGELO, A.C.; ROSSA, U.B.; BOGNOLA, I.A.; MARTINS, C.E.N. Impact of different silvicultural techniques on the productive efficiency of *Ilex paraguariensis* A.St. Hill. **Agroforest Syst**, v.94, p.791-798, 2020.

XIAO-JUAN, B.; LI-JUAN, L.; CHUN-HUA, Z.; YING, G.; WANG-DA, C. Effect of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Pretreatment on Cd Tolerance of Different Rice Cultivars. **Rice Science**, v.18, n.1, p.29–35, 2011.

YANG, Y.; WANG, F.; WAN, Q.; RUAN, J. Transcriptome analysis using RNA-Seq revealed the effects of nitrogen form on major secondary metabolite biosynthesis in tea (*Camellia sinensis*) plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 40, n.127, 2018. Disponível em: <http://doi.org/10.1007/s11738-018-2701-0>. Acesso em: 8 out. 2019.

YUAN, D.G.; DENG, Y.G.; PU, G.L.; HE, G.; ZHANG, J.S.; WENG, Q.; WANG, C.Q. Release kinetics of Si, Al, Fe, and Mn from Acid Soils in the presence of EGCG. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, p.1532-2416, 2017.

ZAMPIER, C. **Avaliação dos níveis de nutrientes, cafeína e taninos após adubação mineral e orgânica, e sua relação com a produtividade na erva-mate (*Ilex paraguariensis* St Hil.)**. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/674?show=full>. Acesso em: 20 mar. 2019.

ZHANG, J.; YANG, R.; LI, Y.C.; WEN, X.; PENG, Y.; NI, X. Use of mineral multi-elemental analysis to authenticate geographical origin of different cultivars of tea in Guizhou, China. **J. Sci. Food Agric.**, v.100, p.3046-3055, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.10335>. Acesso em: 30 dez. 2020.

ZHANG, J.; YANG, Y.; ZHENG, K.; XIE1, M.; FENG, K.; JAWDY, S.S.; GUNTER, L.E.; RANJAN, P.; SINGAN, V. R.; ENGLE, N; LINDQUIST, E.; BARRY, K; SCHMUTZ, J.; ZHAO, N; TSCHAPLINSKI, T.J.; LEBOLDUS, J.; TUSKAN, G. A.; CHEN, J.G.; MUCHERO, W. Genome-wide association studies and expression-based quantitative trait loci analyses reveal roles of HCT2 in caffeoylquinic acid biosynthesis and its regulation by defense responsive transcription factors in *Populus*. **New Phytologist**, v. 220, p. 502–516, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/nph.15297>. Acesso em: 16 out. 2019.

ZHANG, Y.; WANG, Y.; DING, Z.; WANG, H.; SONG, L.; JIA, S.; MA, D. Zinc stress affects ionome and metabolome in tea plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.111, p. 318-328, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.12.014>. Acesso em: 10 out. 2019.

ZIELINSKI, A. A. F.; ALBERTI, A.; BONA, E.; BORTOLINI, D. G.; BENVENUTTI, L.; BACH, F.; Demiate, I. M.; NOGUEIRA, A. A multivariate approach to differentiate yerba mate (*Ilex paraguariensis*) commercialized in the southern Brazil on the basis of phenolics, methylxanthines and in vitro antioxidant activity. **Food Science and**

**Technology**, v. 40, n.3, p.645-652, 2020. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1590/fst.15919>. Acesso em: 20 jan. 2021.

## APÊNDICE 1 – MATERIAL SUPLEMENTAR CAPÍTULO I

S 1 - PERCENTUAL MÉDIO DE RECUPERAÇÃO DOS TEORES DOS COMPONENTES DO TECIDO VEGETAL DE ACORDO COM O PADRÃO ANALÍTICO GBW-10016 *Camellia sinensis* (CERTIFICADO), NO PROCESSO DE EXTRAÇÃO E LEITURA

Componente	Teor certificado (mg kg <sup>-1</sup> )	Teor médio mensurado (mg kg <sup>-1</sup> )	Recuperação (%)
As	0,27	-1,10	-407 *
Ba	37	35	95
Ca	11.800,00	10.489,05	89
Cd	0,076	0,29	380 *
Co	0,3	1,31	435 *
Cr	0,92	0,84	91
Cu	23	21	91
Fe	345	360	98
K	15.500	15.267	98
Mg	2.280	2.287	100
Mn	1.170	1.117	96
Mo	0,11	2,69	2.443 *
Ni	5,4	6,05	112 *
P	2.700	2.369	88
Pb	1,6	-0,25	-16 *
S	4.200	3.557	85
Se	0,1	-0,34	-341 *
Si	2.600	455	18 *
V	0,6	0,22	37 *
Zn	33	32,19	98

FONTE: O Autor (2021)

\* Não foram utilizados nesse trabalho componentes cuja recuperação extrapolou a faixa de 85-100%, desconsiderando as casas decimais.



S 2 - MÉDIAS E DESVIOS PADRÕES (MEAN  $\pm$  SD) DA PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA (g planta<sup>-1</sup>) DE ERVA-MATE MATE CULTIVADAS NOS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL

	Sítio							Posição na Paisagem	
	Barão do Coteji	Cascavel	Cruz Machado	Faxinal do Céu	Fernandes Pinheiro	Ilópolis	Mallet		São João do Triunfo
TC	54,13 A (± 13,49)	35,07 AB (± 6,42)	62,56 A (± 29,12)	39,74 AB (± 5,68)	43,74 AB (± 9,88)	63,64 A (± 18,75)	36,02 AB (± 6,42)	24,31 B (± 9,01)	64,06 A (± 23,39)
	64,75 a (± 4,03)	31,06 a (± 7,88)	30,08 b (± 11,03)	39,07 a (± 6,85)	54,08 a (± 4,62)	80,53 a (± 23,12)	36,06 a (± 10,54)	32,15 a (± 9,42)	46,28 a (± 7,05)
ME	43,52 a (± 21,34)	39,08 a (± 8,75)	95,03 a (± 17,42)	40,41 a (± 10,12)	33,39 b (± 8,67)	46,75 b (± 12,31)	35,98 a (± 9,03)	16,47 a (± 9,20)	77,39 a (± 34,56)

FONTE: O Autor (2021)

TC – Topo da Catena e ME – Meia Encosta. Letras diferentes e maiúsculas na mesma linha indicam diferença significativa ( $\alpha < 5\%$ ) para Sítio e posição na paisagem, letras diferentes e minúsculas na mesma coluna, para o mesmo sítio, indicam diferença significativa ( $\alpha < 5\%$ ) para Interação entre Sítio e posição na paisagem.

S 3 - MÉDIAS E DESVIOS PADRÕES (MEAN  $\pm$  SD) DA PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA (g planta<sup>-1</sup>) DE ERVA-MATE CULTIVADAS NOS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL

Sítio e Posição na Paisagem	Matéria Seca
Cruz Machado - Meia Encosta	95,03 $\pm$ 17,42 a
Ilópolis – Topo da Catena	80,53 $\pm$ 23,12 ab
Seara - Meia Encosta	77,39 $\pm$ 34,56 abc
Barão do Cotegipe – Topo da Catena	64,75 $\pm$ 4,03 abcd
Fernandes Pinheiro – Topo da Catena	54,08 $\pm$ 4,62 abcde
Ilópolis - Meia Encosta	46,75 $\pm$ 12,31 abcde
Seara – Topo da Catena	46,28 $\pm$ 7,05 bcde
Barão do Cotegipe - Meia Encosta	43,52 $\pm$ 21,34 bcde
Faxinal do Céu - Meia Encosta	40,41 $\pm$ 10,12 cde
Cascavel - Meia Encosta	39,08 $\pm$ 8,75 cde
Faxinal do Céu – Topo da Catena	39,07 $\pm$ 6,85 cde
Mallet – Topo da Catena	36,06 $\pm$ 10,54 def
Mallet - Meia Encosta	35,98 $\pm$ 9,03 def
Fernandes Pinheiro - Meia Encosta	33,39 $\pm$ 8,67 ef
São João do Triunfo – Topo da Catena	32,15 $\pm$ 9,42 ef
Cascavel – Topo da Catena	31,06 $\pm$ 7,88 ef
Cruz Machado – Topo da Catena	30,08 $\pm$ 11,03 ef
São João do Triunfo - Meia Encosta	16,47 $\pm$ 9,20 f

FONTE: O Autor (2021)

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa ( $\alpha < 5\%$ ).

S 4 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE MATÉRIA SECA DA PLANTA INTEIRA E ELEMENTOS DISPONÍVEIS NOS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL

Sítios	S	Al	Ba	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
Todos	0,06	-0,36**	0,20*	0,40**	-0,13**	0,56**	0,40**	0,60**	0,61**	0,56**	0,38**
Meia Encosta	0,46**	-0,36*	0,26*	0,69**	-0,02	0,51**	0,39*	0,71**	0,77**	0,69*	0,32
Topo da Catena	-0,33	-0,38*	0,09	-0,28	-0,28	0,84**	0,50**	0,45**	0,34*	0,32	0,77**

FONTE: O Autor (2021)

\*(p<0,05) e \*\* (p<0,01). De 111 a 10,91 - muito forte; de 10,91 a 10,71 - forte; de 10,71 a 10,51 - moderada; 10,51 a 10,31 - fraca; e de 10,31 a 0 - desprezível.



## S5 – (CONCLUSÃO)

Elemento	Sítios								Posição na Paisagem	
	Barão do Cotejepe	Cascavel	Cruz Machado	Faxinal do Céu	Fernandes Pinheiro	Ilópolis	Mallet	São João do Triunfo	Seara	
<b>Al</b> (mg kg <sup>-1</sup> de planta)	223,20 D	435,79 ABC	346,88 BCD	475,45 ABC	650,53 AB	302,20 CD	674,35 A	347,43 BCD	371,49 ABCD	
	<b>TC</b>	287,07 a	449,37 a	445,26 a	736,17 a	238,49 a	722,22 a	334,40 a	491,98 a	470,47 A
	<b>ME</b>	159,34 b	336,93 a	244,40 b	505,64 a	365,91 a	626,48 a	360,46 a	281,12 a	382,80 B
		11,38 AB	17,17 A	9,89 AB	10,00 AB	13,76 AB	8,39 B	13,03 AB	13,72 AB	9,68 AB
<b>Cu</b> (mg kg <sup>-1</sup> de planta)	<b>TC</b>	9,50 a	12,29 a	9,57 a	9,85 a	13,64 a	5,81 a	15,14 a	14,58 a	13,40 a
	<b>ME</b>	13,27 a	22,05 a	10,20 a	10,15 a	13,87 a	10,97 a	11,44 a	12,87 a	6,89 a
		237,90 AB	426,10 A	206,90 AB	264,92 AB	330,42 A	133,42 B	293,76 A	250,16 AB	399,33 A
	<b>Fe</b>	218,84 a	461,95 a	184,34 a	275,60 a	197,60 b	169,63 a	281,66 a	333,51 a	284,03 a
<b>Fe</b> (mg kg <sup>-1</sup> de planta)	<b>ME</b>	256,96 a	390,24 a	229,46 a	254,24 a	463,23 a	97,21 a	305,86 a	166,80 a	553,07 a
		52,16 AB	42,78 ABC	51,24 ABC	60,69 A	40,06 BC	44,89 ABC	56,57 AB	52,39 AB	35,81 C
	<b>Ba</b>	50,99 a	28,12 b	58,58 a	71,29 a	40,28 a	48,84 a	48,06 b	62,25 a	34,00 a
	<b>ME</b>	53,32 a	57,45 a	43,90 b	50,09 a	39,83 a	40,95 a	65,08 a	42,54 b	38,22 a

FONTE: O Autor (2021)

TC – Topo da catena e ME – Meia encosta. Letras diferentes e maiúsculas na mesma linha do elemento indicam diferença significativa ( $\alpha < 5\%$ ) entre sítios e Posição na Paisagem; letras diferentes e minúsculas na mesma coluna, para o mesmo sítio, indicam diferença significativa ( $\alpha < 5\%$ ) para Interação entre sítio e posição na paisagem.

S 6 - MATÉRIA TOTAL MÉDIA DE ELEMENTOS POR PLANTA DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS NOS 18 SOLOS, COLETADOS EM 9 SÍTIOS E 2 POSIÇÕES NA PAISAGEM, REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL (CONTINUA)

Elemento	Sítios							Posição na Paisagem	
	Barão do Cotegipe	Cascavel	Cruz Machado	Faxinal do Cêu	Fernandes Pinheiro	Ilópolis	Mallet	São João do Triunfo	Seara
<b>Ca</b> (mg planta <sup>-1</sup> )	279,94 AB	195,64 ABC	297,64 AB	185,25 ABC	181,68 ABC	285,71 AB	142,53 BC	102,10 C	411,71 A
	TC 273,43 a	137,1 b	121,98 b	189,19 a	243,37 a	365,67 a	129,77 a	139,19 a	210,37 b
ME 286,45 a	254,17 a	473,63 a	181,3 a	119,99 b	205,75 b	155,29 a	65,02 a	562,78 a	256,04 A
<b>K</b> (mg planta <sup>-1</sup> )	680,01 AB	473,98 AB	658,9 AB	375,15 BC	493,86 AB	822,02 A	379,62 BC	243,77 C	812,5 A
	TC 732,63 a	350,14 b	316,24 b	401,41 a	655,23 a	1.081,02 a	354,00 a	320,28 a	533,46 b
ME 627,39 a	597,82 a	1.001,56 a	348,89 a	332,49 b	563,02 b	405,25 a	167,26 a	1.021,78 a	562,83 A
<b>P</b> (mg planta <sup>-1</sup> )	50,61 A	26,9 ABC	39,2 AB	32,57 ABC	35,42 AB	45,68 AB	22,76 BC	16,39 C	49,93 A
	TC 54,73 a	18,47 b	17,93 b	32,18 a	48,5 a	55,42 a	25,47 a	21,36 a	31,39 a
ME 46,48 a	35,33 a	60,48 a	32,97 a	22,35 b	35,94 a	20,06 a	11,42 a	63,83 a	36,54 A
<b>S</b> (mg planta <sup>-1</sup> )	70,20 AB	63,03 AB	78,27 AB	59,60 AB	68,85 AB	81,82 A	52,72 AB	40,53 B	92,32 A
	TC 69,45 a	79,81 a	113,13 a	57,98 a	46,92 b	69,98 a	48,00 a	26,99 b	117,08 a
ME 70,95 a	46,26 b	43,40 b	61,22 a	90,78 a	93,67 a	57,44 a	54,07 a	59,32 b	69,93 A
<b>Mg</b> (mg planta <sup>-1</sup> )	231,72 ABC	181,98 ABC	305,05 AB	157,16 ABC	192,49 ABC	238,61 ABC	137,14 BC	118,35 C	309,55 A
	TC 168,24 a	197,13 a	486,82 a	151,43 a	132,18 b	184,43 a	152,52 a	65,25 b	371,36 a
ME 295,21 a	166,83 a	123,27 b	162,89 a	252,79 a	292,79 a	121,76 a	171,46 a	227,14 a	200,84 A
<b>Zn</b> (mg planta <sup>-1</sup> )	7,19 AB	2,91 D	8,04 A	3,72 CD	4,04 CD	8,00 A	4,33 BCD	1,52 E	8,64 A
	TC 8,28 a	3,86 a	3,32 b	3,42 a	5,62 a	8,20 a	2,83 b	2,06 a	11,87 a
ME 6,10 a	1,96 b	12,76 a	4,03 a	2,46 b	7,81 a	5,82 a	0,98 a	6,23 b	5,35 A
<b>Mn</b> (mg planta <sup>-1</sup> )	37,39 BC	24,28 BC	88,32 AB	8,68 C	15,35 BC	107,06 A	23,11 BC	8,73 C	24,34 BC
	TC 69,76 a	46,43 a	17,34 b	6,10 a	18,12 a	126,26 a	11,41 a	13,99 a	40,84 a
ME 5,02 b	2,14 b	159,31 a	11,26 a	12,59 a	87,86 a	34,8 a	11,97 b	38,86 A	36,49 A

## S6 – (CONCLUSÃO)

Elemento	Sítios							Posição na Paisagem	
	Barão do Cotegipe	Cascavel	Cruz Machado	Faxinal do Céu	Fernandes Pinheiro	Ilópolis	Mallet	São João do Triunfo	Seara
<b>Al</b> (mg planta <sup>-1</sup> )	12,37 CD	14,16 BCD	18,23 ABC	18,7 ABC	28,95 A	17,51 ABC	23,17 AB	8,09 D	21,65 ABC
	TC 18,55 a	16,27 a	13,03 b	17,10 a	40,03 a	18,70 a	24,46 a	10,75 a	23,21 a
	ME 6,19 b	12,05 a	23,43 a	20,31 a	17,86 b	16,32 a	21,89 a	5,42 a	20,48 a
<b>Cu</b> (mg planta <sup>-1</sup> )	0,59 A	0,6 AB	0,62 AB	0,39 AB	0,59 A	0,48 AB	0,45 AB	0,32 B	0,58 AB
	TC 0,61 a	0,36 b	0,30 b	0,39 a	0,74 a	0,45 a	0,49 a	0,43 a	0,62 a
	ME 0,58 a	0,83 a	0,95 a	0,39 a	0,44 b	0,51 a	0,41 a	0,20 b	0,55 a
<b>Fe</b> (mg planta <sup>-1</sup> )	12,56 AB	13,95 AB	12,22 AB	10,59 AB	15,79 AB	7,69 BC	10,01 AB	4,97 C	24,24 A
	TC 8,51 b	16,47 a	17,82 a	10,89 a	6,26 b	7,64 a	9,77 a	4,78 a	22,70 a
	ME 16,60 a	11,43 a	6,61 b	10,28 a	25,33 a	7,74 a	10,25 a	5,16 a	26,28 a
<b>Ba</b> (mg planta <sup>-1</sup> )	2,73 A	1,47 BC	3,45 AB	2,38 AB	1,74 ABC	2,80 A	2,02 ABC	1,20 C	2,25 ABC
	TC 2,01 b	1,09 a	5,55 a	2,83 a	1,31 b	2,26 a	1,74 a	1,02 a	2,61 a
	ME 3,44 a	1,86 a	1,35 b	1,93 b	2,16 a	3,33 a	2,29 a	1,39 a	1,77 a

FONTE: O Autor (2021)

TC – Topo da catena e ME – Meia encosta. Letras diferentes e maiúsculas na mesma linha indicam diferença significativa ( $\alpha < 5\%$ ) para sítio e posição na paisagem, letras diferentes e minúsculas na mesma coluna, para o mesmo sítio, indicam diferença significativa ( $\alpha < 5\%$ ) para interação entre sítio e posição na paisagem.



S 7 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE TEOR DE ELEMENTO EM FRAÇÕES DA PLANTA DE MUDAS DE ERVA-MATE E ELEMENTOS DISPONÍVEIS NOS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL

Fração da Planta	Sítios/posição na paisagem	S	Al	Ba	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
Completa	Todos	-0,01	0,40**	-0,29*	0,09	-0,09	0,61**	0,30**	0,30*	0,06	-0,14	0,56**
	ME	-0,17	0,61**	-0,42*	0,08	-0,05	0,59**	0,44**	0,31	0,03	-0,28	0,74**
	TC	0,12	0,17	-0,15	0,07	-0,17	0,64**	0,28	0,44**	-0,19	0,15	0,46**
Folha Madura	Todos	0,06	0,40**	-0,41**	0,09	-0,06	0,55**	0,22	0,32**	-0,01	-0,29*	0,41**
	ME	0,02	0,55**	-0,49**	0,20	0,03	0,53**	0,24	0,29	-0,15	-0,30	0,58**
	TC	0,09	0,16	0,01	-0,14	-0,23	0,52**	0,37*	0,48**	0,06	0,06	0,50**
Folha Nova	Todos	0,01	0,57**	-0,30*	0,09	0,12	0,27	0,45**	0,31*	0,03	0,01	0,44**
	ME	-0,16	0,83**	-0,53**	0,16	0,24	0,43*	0,53**	0,26	0,04	-0,19	0,69**
	TC	0,10	0,17	0,18	0,03	-0,02	0,16	0,35	0,47*	0,07	0,27	0,32
Ramo Maduro	Todos	-0,05	0,56**	-0,37**	0,23	-0,06	0,37**	0,13	0,25	-0,26*	-0,12	0,34**
	ME	0,05	0,67**	-0,49*	0,32*	-0,17	0,43*	0,19	0,21	-0,15	0,03	0,46*
	TC	-0,14	0,45**	-0,16	0,13	-0,04	0,54**	0,17	0,49**	-0,43*	-0,15	0,31
Ramo Novo	Todos	-0,05	0,15	-0,31**	0,44**	0,05	0,53**	0,23	0,34**	0,15	0,09	0,54**
	ME	0,05	0,13	-0,44**	0,49**	-0,07	0,54**	0,26	0,26	0,16	0,12	0,69**
	TC	-0,17	0,16	-0,14	0,27	0,24	0,58**	0,25	0,66**	-0,17	0,10	0,47**
Lenho	Todos	-0,18	0,55**	-0,22	-0,08	0,04	0,32**	0,36**	0,34**	-0,21	-0,04	0,45**
	ME	-0,33*	0,60**	-0,25	-0,13	0,06	0,29	0,28	0,21	-0,33*	-0,06	0,51**
	TC	-0,09	0,50**	-0,24	0,13	0,10	0,27	0,56**	0,74**	-0,28	0,11	0,49**
Casca	Todos	0,25*	0,40**	-0,27*	0,18	-0,15	0,27*	0,33**	0,27*	0,08	-0,06	0,48**
	ME	0,10	0,65**	-0,34*	0,25	-0,09	0,28	0,42*	0,16	0,05	-0,15	0,56**
	TC	0,45**	0,10	-0,27	0,04	-0,31	0,25	0,21	0,64**	0,01	0,29	0,40*
Raiz	Todos	0,28*	0,20	0,01	0,25*	-0,17	0,47**	0,52**	0,44**	0,22	-0,06	0,55**
	ME	0,23	0,36*	-0,10	0,25	-0,09	0,45**	0,53**	0,35*	0,24	-0,18	0,70**
	TC	0,19	0,00	-0,13	0,25	-0,28	0,60**	0,56**	0,69**	0,03	0,17	0,47**

FONTE: O Autor (2021)

Todos – 18 solos, independente da posição na paisagem; TC – Solos de topo de catena; e ME – Solos de Meia encosta.\* (p<0,05) e \*\* (p<0,01). De |1| a 10,9| - muito forte; de 10,9| a 10,7| – forte; de 10,7| a 10,5| – moderada; 10,5| a 10,3| – fraca; e de 10,3| a 0 – desprezível.

S 8 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE QUANTIDADE DE ELEMENTO POR PLANTA DE MUDAS DE ERVA-MATE E ELEMENTOS DISPONÍVEIS NO SOLO NOS 18 SOLOS REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL

Sítios/posição na paisagem	S	Al	Ba	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Zn
Todos	0,10	0,05	0,03	0,49**	-0,14	0,70**	0,46**	0,44**	0,53**	0,62**
Meia Encosta	0,47**	0,29	0,02	0,71**	-0,07	0,68**	0,42*	0,50**	0,73**	0,66**
Topo da Catena	-0,29	-0,21	-0,01	-0,10	-0,25	0,89**	0,65**	0,43**	0,15	0,82**

FONTE: O Autor (2021)

Todos – 18 solos, independente da posição na paisagem; TC – Solos de topo de catena; e ME – Solos de Meia encosta.\* (p<0,05) e \*\* (p<0,01). De |I| a 10,9| - muito forte; de 10,9| a 10,71 – forte; de 10,71 a 10,51 – moderada; 10,51 a 10,31 – fraca; e de 10,31 a 0 – desprezível.

S 9 - TEORES DE ELEMENTOS (mg kg<sup>-1</sup>) RETIDOS NA MATÉRIA ORGÂNICA NOS 18 SOLOS DE FRAGMENTOS FLORESTAIS SOB ERVAIS NATIVOS (0-20 CM), REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL

Sítio	Posição na Paisagem	Rocha de origem	S	Al	Ba	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
Cascavel	Meia Encosta	Basalto	76,88	0,23	5,40	0,91	0,18	28,05	61,44	93,55	4,23	54,41	0,04
Cascavel	Topo da Catena	Basalto	131,52	1,20	0,62	0,40	0,02	8,33	16,29	3,66	4,03	19,55	0,03
Seara	Meia Encosta	Basalto	76,77	1,05	2,52	0,65	1,04	21,15	23,46	51,07	10,35	48,79	0,07
Seara	Topo da Catena	Basalto	67,29	0,12	1,36	0,51	0,02	21,75	17,02	5,61	5,22	8,60	0,08
São João do Triunfo	Meia Encosta	Arenito	57,48	2,85	0,32	0,06	0,10	7,76	18,69	0,02	5,11	6,27	0,06
São João do Triunfo	Topo da Catena	Arenito	81,13	1,79	0,31	0,07	0,12	6,96	13,21	0,03	5,88	6,04	0,02
Faxinal do Céu	Meia Encosta	Riodacito	212,57	12,60	0,49	0,08	1,54	7,97	13,53	0,15	9,69	12,09	0,06
Faxinal do Céu	Topo da Catena	Riodacito	121,90	1,12	0,20	0,04	0,09	5,68	8,74	0,00	4,62	3,09	0,00
Mallet	Meia Encosta	Folhelho	65,01	0,02	0,26	0,06	0,00	9,33	9,71	0,14	1,88	3,74	0,01
Mallet	Topo da Catena	Folhelho	101,01	0,21	0,26	0,07	0,03	7,07	7,40	0,07	2,84	4,02	0,01
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	Basalto	54,71	0,05	8,60	0,38	0,05	35,66	30,96	171,09	4,52	46,68	0,10
Barão do Cotegipe	Topo da Catena	Basalto	47,63	0,07	0,37	0,27	0,00	16,26	18,56	12,43	1,78	6,25	0,01
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	Argilito	59,57	0,52	0,45	0,05	0,11	12,61	10,83	0,03	3,76	2,02	0,18
Fernandes Pinheiro	Topo da Catena	Argilito	76,90	0,13	0,20	0,07	0,00	7,15	12,94	0,22	2,33	3,11	0,07
Cruz Machado	Meia Encosta	Basalto	62,03	0,38	0,56	0,43	0,12	14,51	11,39	10,79	2,68	10,47	0,04
Cruz Machado	Topo da Catena	Basalto	173,33	16,12	0,25	0,27	1,27	6,42	9,01	0,09	4,57	8,25	0,03
Ilópolis	Meia Encosta	Riodacito	79,52	0,39	0,39	0,11	0,13	11,03	11,57	1,06	5,75	9,96	0,02
Ilópolis	Topo da Catena	Riodacito	237,55	3,16	1,14	0,24	0,72	31,72	28,31	2,02	15,98	18,83	0,15

FONTE: O Autor (2021)

S 10 - TEORES DE ELEMENTOS (mg kg<sup>-1</sup>) RETIDOS NOS ÓXIDOS AMORFOS NOS 18 SOLOS DE FRAGMENTOS FLORESTAIS SOB ERVAIS NATIVOS (0-20 CM), REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL

Sítios	Posição na Paisagem	Rocha de origem	S	Al	Ba	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
Cascavel	Meia Encosta	Basalto	18,90	4029,02	21,87	23,78	14413,05	14,94	61,81	943,87	213,17	472,51	10,71
Cascavel	Topo da Catena	Basalto	70,19	4237,46	8,18	33,05	19231,22	12,06	29,37	256,48	248,03	253,84	7,00
Seara	Meia Encosta	Basalto	177,47	4018,37	27,86	32,64	20729,37	36,48	74,85	1277,40	945,06	664,70	35,93
Seara	Topo da Catena	Basalto	76,76	2879,37	9,79	26,35	17871,25	28,37	28,74	680,84	264,58	378,81	9,10
São João do Triunfo	Meia Encosta	Arenito	76,92	1518,17	0,30	1,13	1559,21	11,40	6,71	6,80	167,93	37,43	0,00
São João do Triunfo	Topo da Catena	Arenito	12,37	2392,85	0,50	1,50	4291,43	12,12	4,71	15,30	165,93	81,52	0,15
Faxinal do Céu	Meia Encosta	Riodacito	243,95	4426,95	1,59	1,75	7878,80	12,50	13,65	20,81	498,96	193,99	2,97
Faxinal do Céu	Topo da Catena	Riodacito	124,69	4652,95	0,77	1,89	7161,01	22,09	10,01	9,91	224,95	184,52	3,01
Mallet	Meia Encosta	Folhelho	67,14	3092,95	1,35	5,33	8708,98	26,28	10,08	185,35	193,46	260,72	2,89
Mallet	Topo da Catena	Folhelho	81,96	3389,96	28,60	5,84	7046,33	35,17	7,04	360,04	203,43	216,18	1,03
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	Basalto	5,07	204,76	0,00	150,33	141,33	0,00	163,01	181,45	161,75	0,00	144,07
Barão do Cotegipe	Topo da Catena	Basalto	187,00	3747,23	5,15	27,04	15011,52	20,70	34,28	1040,44	285,25	450,51	7,16
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	Argilito	34,20	3683,91	2,26	1,56	3134,47	29,43	18,69	53,50	175,61	212,61	1,35
Fernandes Pinheiro	Topo da Catena	Argilito	88,80	3804,28	0,63	3,71	7863,20	10,12	20,68	54,92	181,52	142,80	2,74
Cruz Machado	Meia Encosta	Basalto	200,48	4266,95	9,23	27,33	11266,21	15,01	30,14	924,31	231,12	380,74	9,05
Cruz Machado	Topo da Catena	Basalto	170,73	5869,12	1,12	23,84	10644,11	11,65	13,60	15,28	175,88	196,09	2,08
Ilópolis	Meia Encosta	Riodacito	3,99	203,08	0,00	148,25	138,81	0,00	159,45	176,15	158,80	0,16	140,73
Ilópolis	Topo da Catena	Riodacito	271,13	3674,01	2,66	3,29	6505,27	22,52	24,07	255,15	291,15	247,53	1,21

FONTE: O Autor (2021)

S 11 - TEORES DE ELEMENTOS (mg kg<sup>-1</sup>) RETIDOS NA FRAÇÃO FORMADA POR ÓXIDOS DE AL CRISTALINO E MINERAIS 1:1 E 2:1, NOS 18 SOLOS DE FRAGMENTOS FLORESTAIS SOB ERVAIS NATIVOS (0-20 CM), REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NO SUL DO BRASIL

Sítio	Posição na Paisagem	Rocha de origem	S	Al	Ba	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
Cascavel	Meia Encosta	Basalto	362,16	3077,21	0,01	4,13	184,68	993,28	2,11	36,03	281,67	1433,00	10,59
Cascavel	Topo da Catena	Basalto	45,29	5924,50	0,00	10,91	9,85	1045,11	0,00	2,28	240,38	2374,61	2,65
Seara	Meia Encosta	Basalto	347,70	1646,06	0,65	3,59	284,03	1027,20	3,57	22,87	249,23	1432,51	9,96
Seara	Topo da Catena	Basalto	90,52	2349,08	0,00	6,22	11,31	836,08	0,00	3,08	214,53	2367,58	4,32
São João do Triunfo	Meia Encosta	Arenito	22,12	1476,29	0,00	0,20	1,98	1076,09	0,26	0,05	33,53	1132,61	0,83
São João do Triunfo	Topo da Catena	Arenito	23,83	5010,72	0,00	0,80	4,21	1127,71	0,00	0,05	75,11	1263,93	0,61
Faxinal do Céu	Meia Encosta	Riodacito	68,38	4377,82	0,00	0,67	12,36	1015,74	0,00	0,33	192,99	3916,32	2,22
Faxinal do Céu	Topo da Catena	Riodacito	71,19	5816,51	0,00	0,89	7,26	967,91	0,00	0,06	172,28	3448,91	3,54
Mallet	Meia Encosta	Folhelho	31,80	2976,70	0,00	1,36	1,98	918,13	0,00	0,45	86,58	1720,02	2,43
Mallet	Topo da Catena	Folhelho	46,47	4694,98	5,20	1,43	1,32	943,00	0,00	4,22	110,20	1563,90	2,11
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	Basalto	225,26	2159,23	0,44	6,08	63,01	945,41	0,72	43,87	280,28	2228,41	27,35
Barão do Cotegipe	Topo da Catena	Basalto	97,95	3016,66	0,00	8,83	13,25	1017,01	0,00	2,89	395,15	4880,04	3,55
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	Argilito	30,21	3170,70	0,00	1,05	5,04	910,74	0,00	0,45	88,34	1918,47	1,87
Fernandes Pinheiro	Topo da Catena	Argilito	26,47	4240,57	0,00	0,83	6,46	1129,59	0,00	0,06	72,55	900,13	2,18
Cruz Machado	Meia Encosta	Basalto	160,11	2102,12	0,00	5,32	33,31	975,62	0,46	29,09	313,17	4766,75	6,31
Cruz Machado	Topo da Catena	Basalto	83,45	6502,39	0,00	6,75	11,37	968,80	0,00	0,12	263,41	3148,82	1,15
Ilópolis	Meia Encosta	Riodacito	58,25	2695,81	0,00	0,98	8,50	1015,47	0,00	2,52	128,91	4963,90	2,85
Ilópolis	Topo da Catena	Riodacito	44,49	1737,08	0,00	1,23	5,83	1080,83	0,28	2,13	98,26	9410,71	2,92

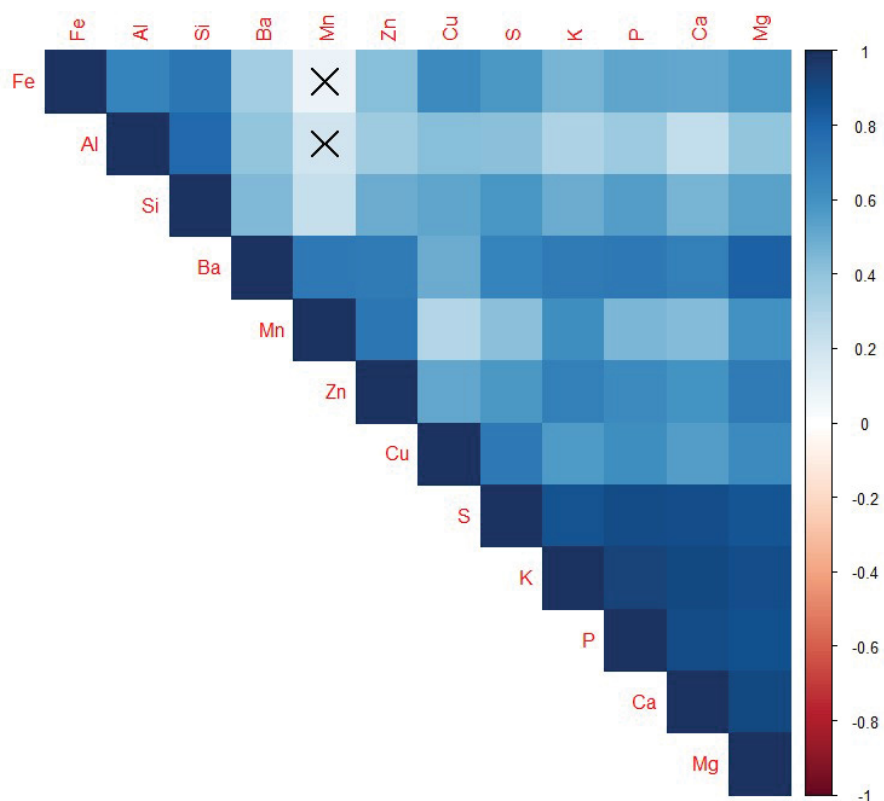
FONTE: O Autor (2021)

S 12 - TEORES DE ELEMENTOS (mg kg<sup>-1</sup>) PSEUDO-TOTAIS (SOLÚVEIS + TROCÁVEIS + RETIDOS NA MO + RETIDOS NOS ÓXIDOS AMORFOS + RETIDOS NA FRAÇÃO CRISTALINA + RESIDUAL) NOS 18 SOLOS DE FRAGMENTOS FLORESTAIS SOB ERVAIS NATIVOS, REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA

Sítio	Posição na Paisagem	Rocha de origem	S	Al	Ba	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
Cascavel	Meia Encosta	Basalto	683	113628	285	287	225952	2240	1750	3892	1366	2239	160
Cascavel	Topo da Catena	Basalto	335	131792	103	337	207776	1715	1094	1315	972	2899	123
Seara	Meia Encosta	Basalto	815	94685	187	205	165442	4027	2894	2929	1943	2411	214
Seara	Topo da Catena	Basalto	324	94655	101	250	198557	3822	2622	2290	964	3018	154
São João do Triunfo	Meia Encosta	Arenito	183	16558	6	2	6293	1418	342	22	224	1463	4
São João do Triunfo	Topo da Catena	Arenito	107	15047	2	3	7400	1352	94	36	212	1362	2
Faxinal do Céu	Meia Encosta	Riodacito	663	148488	297	9	102349	1782	1788	513	1684	4413	161
Faxinal do Céu	Topo da Catena	Riodacito	419	131004	299	8	88771	2046	1526	306	1172	3967	104
Mallet	Meia Encosta	Folhelho	236	109870	66	21	51413	4488	2371	480	492	2278	49
Mallet	Topo da Catena	Folhelho	342	160550	326	23	79251	4899	2479	1829	709	2084	43
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	Basalto	452	86662	283	399	194533	3356	2436	3383	1229	2562	431
Barão do Cotegipe	Topo da Catena	Basalto	458	119214	64	218	181664	2443	2272	2579	1413	5536	161
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	Argilito	182	82438	43	7	23442	4944	2922	158	358	2361	39
Fernandes Pinheiro	Topo da Catena	Argilito	260	107827	20	15	54808	2215	957	193	531	1295	37
Cruz Machado	Meia Encosta	Basalto	604	114107	120	226	217359	1793	1184	4126	1543	5439	207
Cruz Machado	Topo da Catena	Basalto	595	158659	36	119	164921	2441	1806	238	993	3587	96
Ilópolis	Meia Encosta	Riodacito	232	87509	86	166	62638	3121	2130	866	504	5195	228
Ilópolis	Topo da Catena	Riodacito	621	70883	60	20	70929	2829	1985	886	528	9904	86

FONTE: O Autor (2021)

S 13 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE QUANTIDADE DE ELEMENTOS ABSORVIDOS POR MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL



FONTE: O Autor (2021)

Correlações marcadas com X não foram significativas ( $p > 0,05$ ). Escala em tons de azul indicam correlações positivas e em vermelho indicam correlações negativas. De 111 a 10,91 - muito forte; de 10,91 a 10,71 - forte; de 10,71 a 10,51 - moderada; 10,51 a 10,31 - fraca; e de 10,31 a 0 - desprezível.



S 14 - INDICADORES DAS ANÁLISES DE REGRESSÕES MÚLTIPLAS PARA DETERMINAR O EFEITO DO TEOR DOS ELEMENTOS EM CADA FRAÇÃO DO SOLO SOBRE O TEOR DO RESPECTIVO ELEMENTO NO TECIDO VEGETAL (CONTINUA)

Elemento	Frações do solo	$\beta$	T	F	p-valor	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado
K	Constante	4,59,84	0,399	9,55	>0,001	0,4723	0,4228
	Solúvel	3,60	0,864				
	Trocável	2,41	0,662				
	Matéria Orgânica	130,35	0,001 *				
	Óxidos Amorfos	-24,14	0,425				
	Minerais Cristalinos	4,52	0,385				
	Resíduo	0,23	0,498				
Mg	Constante	4939,93	<0,001 ***	4,60	>0,001	0,3015	0,2360
	Solúvel	-5,51	0,620				
	Trocável	6,10	<0,001 ***				
	Matéria Orgânica	-11,95	0,262				
	Óxidos Amorfos	-1,75	0,506				
	Minerais Cristalinos	-65,31	0,756				
	Resíduo	-0,43	0,001 **				
P	Constante	768,64	<0,001***	3,053	0,011	0,2225	0,1497
	Solúvel	-0,80	0,982				
	Trocável	-234,71	0,013*				
	Matéria Orgânica	12,11	0,101				
	Óxidos Amorfos	0,18	0,249				
	Minerais Cristalinos	-0,75	0,061				
	Resíduo	0,44	<0,001 ***				
Al	Constante	161,5	0,023 *	4,80	>0,001	0,3105	0,2459
	Solúvel	4,06	0,155				
	Trocável	0,87	0,003				
	Matéria Orgânica	-0,18	0,006				
	Óxidos Amorfos	3,31 10 <sup>-3</sup>	0,875				
	Minerais Cristalinos	2,99 10 <sup>-2</sup>	0,126				
	Resíduo	5,04 10 <sup>-4</sup>	0,494				
S	Constante	1714,40	<0,001 ***	2,60	0,025	0,1962	0,1209
	Solúvel	-15,57	0,313				
	Trocável	7,44	0,154				
	Matéria Orgânica	-0,05	0,609				
	Óxidos Amorfos	-0,09	0,200				
	Minerais Cristalinos	4,40	0,002 **				
	Resíduo	-6,09	0,004 **				

## S14 – (CONCLUSÃO)

Elemento	Frações do solo	$\beta$	T	F	p-valor	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado
Mn	Constante	265,53	0,002 **	19,69	>0,001	0,6487	0,6157
	Solúvel	32,54	<0,001 ***				
	Trocável	3,78	0,002 **				
	Matéria Orgânica	-10,99	<0,001 ***				
	Óxidos Amorfos	-0,48	0,025 *				
	Minerais Cristalinos	-8,34	0,516				
	Resíduo	0,32	0,020 *				
Cu	Constante	13,01	<0,001 ***	1,81	0,1104	0,1453	0,0652
	Solúvel	-23,53	0,276				
	Trocável	15,56	0,741				
	Matéria Orgânica	-5,73	0,431				
	Óxidos Amorfos	-0,01	0,410				
	Minerais Cristalinos	-1,40	0,021 *				
	Resíduo	0,06	0,019 *				
Fe	Constante	196,60	<0,001 ***	2,33	0,042	0,1797	0,1028
	Solúvel	3,00	0,574				
	Trocável	2,19	0,395				
	Matéria Orgânica	-165,00	0,059				
	Óxidos	0,01	0,013 *				
	Caulinita e Gibsita	0,21	0,552				
	Resíduo	-1,04 10 <sup>-4</sup>	0,766				
Zn	Constante	82,24	<0,001 ***	10,13	>0,001	0,4871	0,4390
	Solúvel	-132,21	0,021 *				
	Trocável	29,95	0,002 **				
	Matéria Orgânica	-21,99	0,827				
	Óxidos Amorfos	0,28	0,238				
	Minerais Cristalinos	-5,40	<0,001 ***				
	Resíduo	0,34	0,004 **				
Ba	Constante	46,85	<0,001 ***	5,84	>0,001	0,3539	0,2933
	Solúvel	7,20	0,424				
	Trocável	0,33	0,294				
	Matéria Orgânica	-5,17	0,051				
	Óxidos Amorfos	-0,84	0,006 **				
	Minerais Cristalinos	5,14	0,0102 *				
	Resíduo	0,04	0,0192 *				
Si	Constante	158,76	0,0131 *	3,40	0,2411	0,1701	0,0050
	Solúvel	-5,68	0,0612				
	Trocável	6,62	0,4081				
	Matéria Orgânica	-2,61	0,0479 *				
	Óxidos Amorfos	0,20	0,0636				
	Minerais Cristalinos	-0,01	0,0572				
	Resíduo	0,48	0,0232 *				

S 15 - INDICADORES DAS ANÁLISES DE REGRESSÕES MÚLTIPLAS PARA DETERMINAR O EFEITO DO TEOR DOS ELEMENTOS EM CADA FRAÇÃO DO SOLO SOBRE A QUANTIDADE DO RESPECTIVO ELEMENTO ABSORVIDO PELA PLANTA (CONTINUA)

Elemento	Frações do solo	$\beta$	T	F	p-valor	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado
K	Constante	-400,16	0,520	16,05	<0,001	0,6007	0,5633
	Solúvel	-0,99	0,679				
	Trocável	2,05	0,002				
	Matéria Orgânica	1,59	0,717				
	Óxidos Amorfos	8,92	0,011 *				
	Minerais Cristalinos	0,54	0,366				
	Resíduo	-0,06	0,114				
Mg	Constante	245,7	<0,001	6,259	<0,001	0,3698	0,3107
	Solúvel	-1,61	0,2807				
	Trocável	1,09	<0,001				
	Matéria Orgânica	-3,97	0,007 **				
	Óxidos Amorfos	0,08	0,829				
	Minerais Cristalinos	17,93	0,523				
	Resíduo	-0,02	0,192				
P	Constante	23,71	<0,001***	9,482	<0,001	0,4706	0,421
	Solúvel	15,22	<0,001***				
	Trocável	-25,15	0,006 **				
	Matéria Orgânica	2,2	0,003 **				
	Óxidos Amorfos	0,02	0,265				
	Minerais Cristalinos	-0,03	0,437				
	Resíduo	0,02	0,077				
Al	Constante	7,61	0,008 **	7,71	<0,001	0,4197	0,3653
	Solúvel	0,51	<0,001***				
	Trocável	0,02	0,1372				
	Matéria Orgânica	-0,78	0,003 **				
	Óxidos Amorfos	1,22 10 <sup>-3</sup>	0,151				
	Minerais Cristalinos	-3,2 10 <sup>-4</sup>	0,678				
	Resíduo	4,00 10 <sup>-5</sup>	0,213				
S	Constante	10,32	0,446	9,872	<0,001	0,4807	0,432
	Solúvel	5,27	<0,001 ***				
	Trocável	-0,71	0,055				
	Matéria Orgânica	0,05	0,387				
	Óxidos Amorfos	0,009	0,057				
	Minerais Cristalinos	-0,295	0,003 **				
	Resíduo	0,36	0,015 *				

## S15 – (CONCLUSÃO)

Elemento	Frações do solo	$\beta$	T	F	p-valor	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado
Mn	Constante	8,19	0,240				
	Solúvel	1,39	0,007 **				
	Trocável	0,39	<0,001 ***				
	Matéria Orgânica	-1,24	<0,001 ***				
	Óxidos Amorfos	-0,04	0,006 **				
	Minerais Cristalinos	1,63	0,1304				
	Resíduo	0,01	0,211				
Cu	Constante	0,43	<0,001 ***	7,31	<0,001	0,4066	0,351
	Solúvel	3,43	<0,001 ***				
	Trocável	-1,52	0,390				
	Matéria Orgânica	0,03	0,899				
	Óxidos Amorfos	1,51 10 <sup>-5</sup>	0,981				
	Minerais Cristalinos	-0,02	0,316				
	Resíduo	1,10 10 <sup>-2</sup>	0,231				
Fe	Constante	6,58	<0,001 ***	8,924	<0,001	0,455	0,4045
	Solúvel	0,95	<0,001 ***				
	Trocável	-0,07	0,524				
	Matéria Orgânica	0,94	0,693				
	Óxidos Amorfos	5,16 10 <sup>-4</sup>	0,004 **				
	Minerais Cristalinos	0,024	0,105				
	Resíduo	-1,73 10 <sup>-5</sup>	0,249				
Zn	Constante	0,48	0,402	29,26	<0,001	0,7329	0,7078
	Solúvel	1,65	0,548				
	Trocável	3,85	<0,001 ***				
	Matéria Orgânica	3,43	<0,001 ***				
	Óxidos Amorfos	-0,04	<0,001 ***				
	Minerais Cristalinos	-0,30	<0,001 ***				
	Resíduo	0,03	<0,001 ***				
Ba	Constante	1,93	<0,001 ***	4,218	0,001	0,2834	0,2162
	Solúvel	0,09	0,944				
	Trocável	0,13	<0,001 ***				
	Matéria Orgânica	-1,14	<0,001 ***				
	Óxidos Amorfos	-0,07	0,02 *				
	Minerais Cristalinos	0,26	0,153				
	Resíduo	2,00 10 <sup>-3</sup>	1,96				

FONTE: O Autor (2021)

\*(p&lt;0,05), \*\* (p&lt;0,01) e \*\*\*(p&lt;0,001).

S 16 - INDICADORES DAS ANÁLISES DE REGRESSÕES MÚLTIPLAS PARA DETERMINAR O EFEITO DA CONFIGURAÇÃO ELEMENTAR DO TECIDO VEGETAL SOBRE O TEOR DE UM DETERMINADO ELEMENTO NO TECIDO VEGETAL (CONTINUA)

Elemento	Frações do solo	$\beta$	T	F	p-valor	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado
K	Constante	3,92 10 <sup>-16</sup>	1,000	8,35	<0,001 ***	0,6089	0,5360
	Mg	-6,29 10 <sup>-2</sup>	0,537				
	S	2,72 10 <sup>-1</sup>	0,037*				
	Al	-5,00 10 <sup>-2</sup>	0,794				
	Ba	-3,25 10 <sup>-1</sup>	<0,001***				
	Fe	2,10 10 <sup>-2</sup>	0,103				
	Zn	2,10 10 <sup>-2</sup>	0,894				
	Cu	-1,59 10 <sup>-1</sup>	0,219				
	P	4,14 10 <sup>-1</sup>	<0,001***				
	Mn	3,64 10 <sup>-1</sup>	0,002 **				
	Ca	2,72 10 <sup>-1</sup>	0,054				
	Si	-7,56 10 <sup>-2</sup>	0,641				
Mg	Constante	-8,37 10 <sup>-17</sup>	1,000	2,97	0,003**	0,3568	0,2368
	Al	2,98 10 <sup>-1</sup>	0,222				
	S	-2,15 10 <sup>-2</sup>	0,900				
	P	-6,44 10 <sup>-2</sup>	0,674				
	Ba	-9,23 10 <sup>-2</sup>	0,465				
	K	-1,03 10 <sup>-1</sup>	0,537				
	Zn	-1,29 10 <sup>-1</sup>	0,318				
	Cu	1,92 10 <sup>-1</sup>	0,250				
	Fe	2,37 10 <sup>-1</sup>	0,152				
	Mn	4,41 10 <sup>-1</sup>	0,004 **				
	Ca	6,10 10 <sup>-1</sup>	<0,001 ***				
	Si	-2,80 10 <sup>-1</sup>	0,175				
P	Constante	-1,04 10 <sup>-16</sup>	1,000	6,06	<0,001***	0,5305	0,4430
	Mg	-4,70 10 <sup>-2</sup>	0,674				
	S	-9,40 10 <sup>-3</sup>	0,949				
	Al	-1,19 10 <sup>-1</sup>	0,572				
	Ba	2,51 10 <sup>-1</sup>	0,017 *				
	K	4,97 10 <sup>-1</sup>	< 0,001 ***				
	Zn	4,85 10 <sup>-2</sup>	0,662				
	Cu	1,01 10 <sup>-1</sup>	0,478				
	Fe	-7,63 10 <sup>-2</sup>	0,592				
	Mn	-3,92 10 <sup>-1</sup>	0,003 **				
	Ca	2,08 10 <sup>-1</sup>	0,184				
	Si	1,62 10 <sup>-1</sup>	0,360				

## S 16 - (CONTINUAÇÃO)

Elemento	Frações do solo	$\beta$	T	F	p-valor	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado
Al	Constante	2,11 10 <sup>-16</sup>	1,000	24,18	<0,001 ***	0,8184	0,7846
	Mg	8,42 10 <sup>-2</sup>	0,222				
	S	2,10 10 <sup>-1</sup>	0,018 *				
	P	-4,60 10 <sup>-2</sup>	0,572				
	Ba	1,08 10 <sup>-1</sup>	0,104				
	K	-2,32 10 <sup>-2</sup>	0,794				
	Zn	3,77 10 <sup>-3</sup>	0,956				
	Cu	-1,95 10 <sup>-1</sup>	0,026 *				
	Fe	2,18 10 <sup>-1</sup>	0,012 *				
	Mn	-1,43 10 <sup>-1</sup>	0,089				
	Ca	-3,66 10 <sup>-1</sup>	<0,001 ***				
	Si	6,14 10 <sup>-1</sup>	<0,001 ***				
S	Constante	-3,45 10 <sup>-16</sup>	1,000	8,93	<0,001	0,6247	0,5547
	Mg	-1,26 10 <sup>-2</sup>	0,900				
	K	2,62 10 <sup>-1</sup>	0,038 *				
	Al	4,34 10 <sup>-1</sup>	0,018 *				
	Ba	1,19 10 <sup>-1</sup>	0,215				
	Fe	-1,61 10 <sup>-1</sup>	0,203				
	Zn	-1,13 10 <sup>-1</sup>	0,252				
	Cu	5,83 10 <sup>-1</sup>	<0,001 ***				
	P	-7,51 10 <sup>-3</sup>	0,949				
	Mn	-1,31 10 <sup>-1</sup>	0,285				
	Ca	3,08 10 <sup>-1</sup>	0,025 *				
	Si	-1,26 10 <sup>-1</sup>	0,425				
Fe	Constante	-1,44 10 <sup>-16</sup>	1,000	8,27	<0,001 ***	0,6065	0,5332
	Mg	1,45 10 <sup>-1</sup>	0,152				
	S	-1,69 10 <sup>-1</sup>	0,203				
	Al	4,72 10 <sup>-1</sup>	0,012*				
	Ba	8,37 10 <sup>-1</sup>	0,932				
	K	2,11 10 <sup>-1</sup>	0,1030				
	Zn	1,17 10 <sup>-1</sup>	0,245				
	Cu	3,92 10 <sup>-1</sup>	0,002 **				
	P	-6,40 10 <sup>-2</sup>	0,592				
	Mn	-2,00 10 <sup>-1</sup>	0,1067				
	Ca	1,30 10 <sup>-1</sup>	0,364				
	Si	1,00 10 <sup>-1</sup>	0,538				

## S 16 - (CONTINUAÇÃO)

Elemento	Frações do solo	$\beta$	T	F	p-valor	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado
Mn	Constante	-1,39 10 <sup>-16</sup>	1,000	7,23	<0,001***	0,5741	0,4946
	Al	-3,36 10 <sup>-1</sup>	0,089				
	S	-1,48 10 <sup>-1</sup>	0,285				
	P	-3,56 10 <sup>-1</sup>	0,003 **				
	Ba	1,91 10 <sup>-1</sup>	0,060				
	K	3,97 10 <sup>-1</sup>	0,002 **				
	Mg	2,92 10 <sup>-1</sup>	0,004 **				
	Zn	3,42 10 <sup>-1</sup>	<0,001 ***				
	Fe	-2,17 10 <sup>-1</sup>	0,107				
	Cu	-3,06 10 <sup>-2</sup>	0,823				
	Ca	-3,52 10 <sup>-1</sup>	0,016 *				
	Si	2,94 10 <sup>-1</sup>	0,078				
	Constante	9,02 10 <sup>-18</sup>	1,000	2,85	0,004**	0,3469	0,2252
Zn	Al	1,35 10 <sup>-2</sup>	0,956				
	S	-1,96 10 <sup>-1</sup>	0,252				
	P	6,74 10 <sup>-2</sup>	0,661				
	Ba	9,43 10 <sup>-2</sup>	0,458				
	K	2,24 10 <sup>-2</sup>	0,894				
	Mg	-1,31 10 <sup>-1</sup>	0,318				
	Cu	5,91 10 <sup>-2</sup>	0,727				
	Fe	1,95 10 <sup>-1</sup>	0,245				
	Mn	5,24 10 <sup>-1</sup>	<0,001 ***				
	Ca	2,57 10 <sup>-1</sup>	0,163				
	Si	1,89 10 <sup>-1</sup>	0,366				
	Constante	2,50 10 <sup>-16</sup>	1,000	8,37	<0,001***	0,6095	0,5367
Cu	Al	-4,19 10 <sup>-1</sup>	0,026 *				
	S	6,07 10 <sup>-1</sup>	<0,001 ***				
	P	8,44 10 <sup>-2</sup>	0,478				
	Ba	-1,02 10 <sup>-1</sup>	0,297				
	K	-1,59 10 <sup>-1</sup>	0,219				
	Mg	1,16 10 <sup>-1</sup>	0,250				
	Zn	3,53 10 <sup>-2</sup>	0,726				
	Fe	3,89 10 <sup>-1</sup>	0,002 **				
	Mn	-2,80 10 <sup>-2</sup>	0,822				
	Ca	-3,18 10 <sup>-1</sup>	0,023 *				
	Si	2,70 10 <sup>-1</sup>	0,091				



## S 16 – (CONCLUSÃO)

Elemento	Frações do solo	$\beta$	T	F	p-valor	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado
Ba	Constante	$7,68 \cdot 10^{-17}$	1,000	2,44	0,013 *	0,3133	0,1853
	Mg	$-9,85 \cdot 10^{-2}$	0,464				
	K	$-5,70 \cdot 10^{-1}$	<0,001 ***				
	Al	$4,09 \cdot 10^{-1}$	0,104				
	S	$2,18 \cdot 10^{-1}$	0,215				
	Fe	$1,46 \cdot 10^{-2}$	0,933				
	Zn	$9,92 \cdot 10^{-2}$	0,458				
	Cu	$-1,80 \cdot 10^{-1}$	0,297				
	P	$3,67 \cdot 10^{-1}$	0,017 *				
	Mn	$3,08 \cdot 10^{-1}$	0,060				
	Ca	$8,43 \cdot 10^{-2}$	0,657				
	Si	$-2,92 \cdot 10^{-1}$	0,171				

FONTE: O Autor (2021)

\*(p&lt;0,05), \*\* (p&lt;0,01) e \*\*\*(p&lt;0,001).

S 17 - FATOR DE TRANSLOCAÇÃO DOS ELEMENTOS EM MUDAS DE ERVA-MATE EM CADA SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM, DE PLANTAS CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL

Elementos	Sítio							Posição na Paisagem	
	Barão do Cotegipe	Cascavel	Cruz Machado	Faxinal do Céu	Fernandes Pinheiro	Ilópolis	Mallet	São João do Triunfo	Seara
Ca	1,89 A	2,28 A	2,52 A	1,50 A	1,44 A	2,80 A	2,10 A	2,17 A	2,36 A
	TC 2,75 a ME 1,03 b	3,43 a 1,13 b	2,09 a 2,95 a	1,59 a 1,41 a	1,30 b 1,64 a	2,35 a 3,14 a	1,64 a 2,71 a	2,50 a 1,85 a	2,88 a 1,97 a
K	1,54 A	1,56 A	1,48 A	1,20 A	1,78 A	1,45 A	1,78 A	1,41 A	1,56 A
	TC 1,11 a ME 1,97 a	1,45 a 1,67 a	1,66 a 1,30 a	1,29 a 1,12 a	1,67 a 1,93 a	1,53 a 1,40 a	1,73 a 1,86 a	1,28 a 1,54 a	1,52 a 1,59 a
P	1,00 A	0,88 A	1,05 A	0,90 A	0,93 A	0,78 A	1,07 A	1,05 A	0,78 A
	TC 0,74 a ME 1,25 a	0,87 a 0,89 a	1,29 a 0,81 a	0,85 a 0,96 a	0,90 a 0,96 a	0,94 a 0,65 a	1,18 a 0,93 a	1,02 a 1,08 a	0,77 a 0,79 a
S	0,47 A	0,40 A	0,45 A	0,38 A	0,40 A	0,34 A	0,39 A	0,47 A	0,38 A
	TC 0,39 a ME 0,54 a	0,38 a 0,43 a	0,41 a 0,50 a	0,42 a 0,33 a	0,53 a 0,30 a	0,35 a 0,33 a	0,40 a 0,38 a	0,41 a 0,52 a	0,39 a 0,36 a
Mg	1,82 AB	1,76 AB	1,60 AB	1,92 AB	1,49 AB	1,45 B	1,63 AB	2,28 A	1,59 AB
	TC 1,68 a ME 1,95 a	1,36 b 2,16 a	1,40 a 1,81 a	1,80 a 2,05 a	1,75 a 1,29 b	1,48 a 1,41 a	1,56 a 1,69 a	2,47 a 2,09 a	1,58 a 1,59 a
Mn	7,85 A	17,81 A	10,85 A	11,61 A	11,54 A	14,52 A	8,46 A	12,36 A	16,13 A
	TC 10,69 a ME 5,01 a	33,34 a 2,29 b	9,56 a 12,13 a	9,93 a 13,29 a	9,33 a 14,5 a	13,72 a 15,12 a	7,40 a 9,88 a	15,48 a 9,24 a	12,72 a 18,68 a
Zn	0,43 AB	0,57 AB	0,39 AB	0,25 B	0,35 AB	0,70 A	0,42 AB	0,35 AB	0,71 A
	TC 0,45 a ME 0,42 a	0,79 a 0,34 b	0,25 b 0,53 a	0,31 a 0,19 a	0,31 a 0,41 a	0,61 a 0,76 a	0,28 a 0,61 a	0,28 a 0,42 a	1,12 a 0,39 b
Al	0,29 ABC	0,16 BC	0,26 ABC	0,38 AB	0,11 C	0,26 ABC	0,22 ABC	0,41 A	0,22 ABC
	TC 0,32 a ME 0,26 a	0,23 a 0,09 a	0,24 a 0,29 a	0,27 a 0,48 a	0,11 a 0,11 a	0,29 a 0,24 a	0,24 a 0,19 a	0,41 a 0,41 a	0,23 a 0,22 a
Cu	0,27 AB	0,20 AB	0,22 AB	0,35 A	0,15 B	0,27 AB	0,19 AB	0,24 AB	0,23 AB
	TC 0,31 a ME 0,22 a	0,23 a 0,16 a	0,24 a 0,21 a	0,32 a 0,38 a	0,16 a 0,15 a	0,36 a 0,21 a	0,22 a 0,14 a	0,23 a 0,24 a	0,15 a 0,30 a
Fe	0,29 AB	0,11 BC	0,13 ABC	0,16 ABC	0,09 BC	0,31 A	0,21 ABC	0,22 ABC	0,08 C
	TC 0,19 a ME 0,39 a	0,08 a 0,13 a	0,12 a 0,14 a	0,17 a 0,16 a	0,11 a 0,08 a	0,24 a 0,41 a	0,21 a 0,21 a	0,15 a 0,29 a	0,10 a 0,07 a
Ba	0,93 A	1,01 A	0,92 A	0,95 A	1,00 A	1,25 A	0,80 A	0,94 A	1,04 A
	TC 0,47 b ME 1,38 a	0,49 b 1,53 a	1,06 a 0,77 a	0,90 a 1,00 a	0,79 a 1,16 a	1,29 a 1,21 a	1,11 a 0,56 a	0,65 b 1,23 a	0,91 a 1,20 a

FONTE: O Autor (2021)

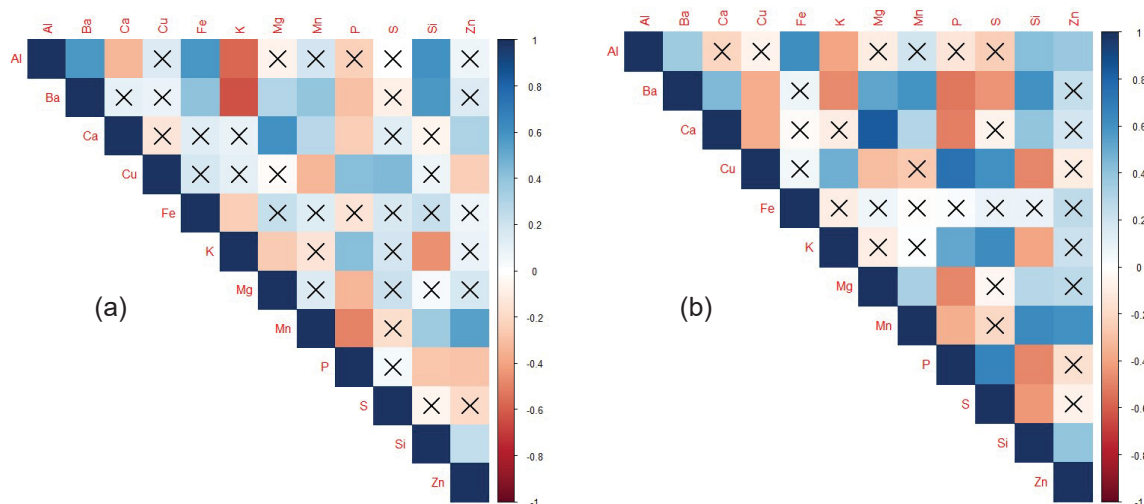
TC – Topo da catena e ME – Meia encosta. Letras diferentes e maiúsculas na mesma linha indicam diferença significativa ( $\alpha < 5\%$ ) para sítio e posição na paisagem, letras diferentes e minúsculas na mesma coluna, para o mesmo sítio, indicam diferença significativa ( $\alpha < 5\%$ ) para interação entre sítio e posição na paisagem.

S 18 - TEOR MÉDIO DE ELEMENTOS EM CADA FRAÇÃO DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL

Fração da Planta	Elementos										
	Ca	K	Mg	S	P	Mn	Zn	Cu	Ba	Fe	Al
	(g kg <sup>-1</sup> )					(mg kg <sup>-1</sup> )					
Folha Jovem	3,97 d	20,06 a	4,99 b	1,04 c	0,97 a	936,44 b	49,79 e	6,29 c	26,68 f	52,62 d	104,12 d
Folha Madura	6,65 b	14,06 b	6,87 a	1,14 b	0,74 b	1.803,23 a	84,71 cd	5,09 d	47,70 cd	95,50 c	212,83 c
Ramo Jovem	4,51 c	12,93 b	3,11 d	0,94 d	0,80 b	258,78 c	89,48 c	6,29 c	60,00 b	43,27 e	110,92 d
Ramo Maduro	3,80 de	8,10 e	1,96 e	0,56 e	0,55 c	186,78 c	90,96 c	4,65 e	45,39 e	29,32 f	98,92 d
Lenho	0,88 f	4,41 f	0,66 f	0,31 f	0,52 c	102,03 d	77,54 d	5,05 d	12,27 f	49,24 e	124,70 d
Casca	13,66 a	11,47 c	5,12 b	0,60 e	0,73 b	520,43 b	299,93 a	11,60 b	126,95 a	352,56 b	485,57 b
Raiz	3,65 e	9,36 d	4,13 c	2,88 a	0,83 ab	154,87 c	173,90 b	25,71 a	56,29 c	767,79 a	1.067,56 a

FONTE: O Autor (2021)  
Kruskall-Wallis e teste Dunn (p<0,05). Letras diferentes nas colunas indicam diferença significativa para teor de elemento entre os tecidos de erva-mate

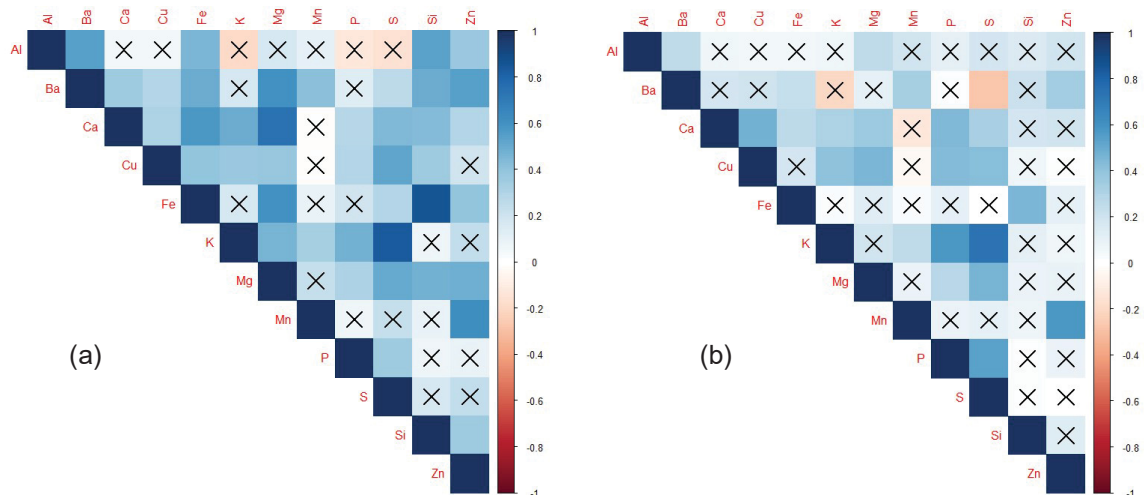
**S 19 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE TEORES DE ELEMENTOS EM FOLHAS DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL**



FONTE: O Autor (2021)

Folha Madura (a) e Folha Jovem (b). Correlações marcadas com X não foram significativas ( $p > 0,05$ ). Escala em tons de azul indicam correlações positivas e em vermelho indicam correlações negativas. De 111 a 10,91 - muito forte; de 10,91 a 10,71 - forte; de 10,71 a 10,51 - moderada; 10,51 a 10,31 - fraca; e de 10,31 a 0 - desprezível.

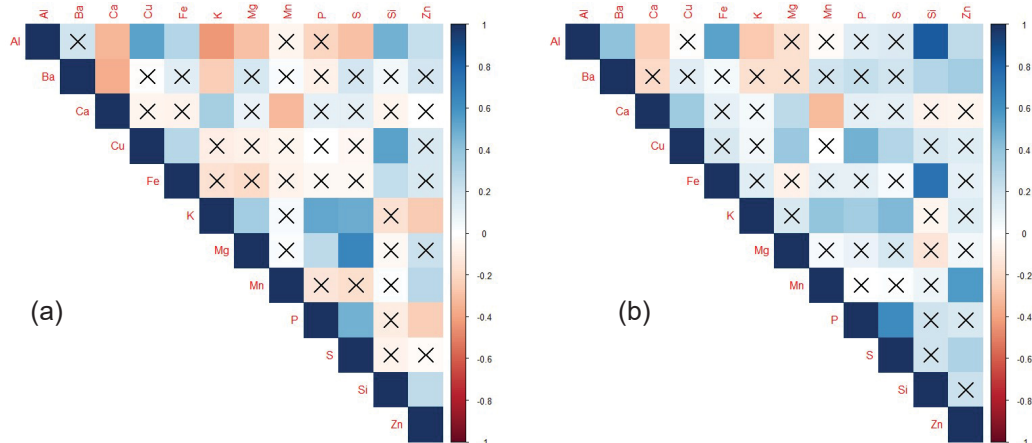
**S 20 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE TEORES DE ELEMENTOS EM RAMOS DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL**



FONTE: O Autor (2021)

Ramo Maduro (a) e Ramo Jovem (b). Correlações marcadas com X não foram significativas ( $p > 0,05$ ). Escala em tons de azul indicam correlações positivas e em vermelho indicam correlações negativas. De 111 a 10,91 - muito forte; de 10,91 a 10,71 - forte; de 10,71 a 10,51 - moderada; 10,51 a 10,31 - fraca; e de 10,31 a 0 - desprezível.

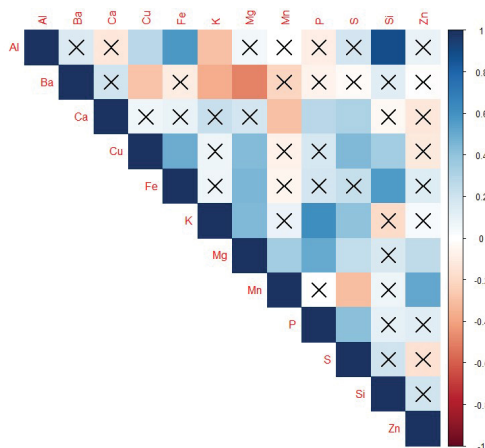
**S 21 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE TEORES DE ELEMENTOS EM LENHO E CASCA DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL**



FONTE: O Autor (2021)

Lenho (a) e Casca (b). Correlações marcadas com X não foram significativas ( $p > 0,05$ ). Escala em tons de azul indicam correlações positivas e em vermelho indicam correlações negativas. De 1,0 a 0,91 - muito forte; de 0,91 a 0,71 - forte; de 0,71 a 0,51 - moderada; 0,51 a 0,31 - fraca; e de 0,31 a 0 - desprezível.

**S 22 - CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE TEORES DE ELEMENTOS EM RAIZ DE MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL**



FONTE: O Autor (2021)

Correlações marcadas com X não foram significativas ( $p > 0,05$ ). Escala em tons de azul indicam correlações positivas e em vermelho indicam correlações negativas. De 1,0 a 0,91 - muito forte; de 0,91 a 0,71 - forte; de 0,71 a 0,51 - moderada; 0,51 a 0,31 - fraca; e de 0,31 a 0 - desprezível.

S 23 - TEORES DE ELEMENTOS DISPONÍVEIS DE ACORDO COM ANÁLISES DE ROTINA, NOS 18 SOLOS DE FRAGMENTOS FLORESTAIS SOB ERVAIS NATIVOS, REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE, NA CAMADA 0-20 cm.

Local	pH CaCl <sub>2</sub>	P <sup>(1)</sup> mg kg <sup>-1</sup>	Ca <sup>(2)</sup>	Mg <sup>(2)</sup>	K <sup>(1)</sup> cmolc dm <sup>-3</sup>	Al <sup>(2)</sup>	H + Al	CE mS/cm	MO <sup>(3)</sup> %	Mn <sup>(1)</sup>	Fe <sup>(1)</sup>	Zn <sup>(1)</sup> mg kg <sup>-1</sup>	Cu <sup>(1)</sup>	Ba <sup>(1)</sup>	Sj <sup>(1)</sup>
BARÃO DO COTEGIPE ME	5,33	0,80	20,10	4,40	0,04	24,58	0,00	4,75	2,25	9,68	18,05	255,07	5,81	1,98	1,15 43,64
BARÃO DO COTEGIPE TC	4,58	7,80	4,39	2,70	0,10	7,24	0,00	7,48	0,49	4,40	24,13	45,59	6,02	1,28	1,37 59,80
CASCADEL ME	5,85	5,20	4,80	2,30	0,29	7,41	0,00	4,09	2,16	10,87	457,14	35,41	1,97	7,80	1,17 68,81
CASCADEL TC	3,87	4,10	1,65	0,82	0,25	2,74	1,75	8,11	0,70	8,15	49,13	142,06	5,76	1,09	1,64 72,64
CRUZ MACHADO ME	4,46	3,80	4,50	1,18	0,07	5,78	0,29	11,48	0,50	12,21	23,48	48,29	14,09	0,96	1,35 59,91
CRUZ MACHADO TC	3,69	2,10	0,44	0,20	0,10	0,77	4,64	23,26	0,56	14,19	19,74	43,80	7,03	0,88	1,35 76,01
FAXINAL DO CÉU ME	3,43	2,70	0,31	0,18	0,41	0,93	4,97	26,55	0,96	15,22	458,74	47,79	9,13	4,78	1,48 71,26
FAXINAL DO CÉU TC	3,55	3,30	0,36	0,22	0,11	0,74	5,05	17,47	0,77	7,57	67,91	77,30	22,47	1,27	1,23 36,14
FERNANDES PINHEIRO ME	3,82	1,70	2,05	1,14	0,09	3,32	5,76	18,54	0,62	6,67	41,95	53,60	6,73	0,88	1,22 78,31
FERNANDES PINHEIRO TC	4,24	7,60	3,78	1,22	0,15	5,17	1,04	5,72	0,89	8,46	12,28	73,81	11,03	1,34	1,31 47,22
ILÓPOLIS ME	3,73	1,20	2,31	0,60	0,05	2,97	2,67	14,94	1,44	7,57	214,41	73,72	1,66	16,53	1,39 78,68
ILÓPOLIS TC	3,76	12,44	2,29	0,26	0,78	3,45	2,76	17,85	1,14	11,89	73,21	13,82	19,31	8,83	1,78 99,84
MALLET ME	3,56	0,90	0,56	0,26	0,06	0,89	4,98	17,47	0,46	4,13	10,13	51,92	19,45	1,07	1,06 46,98
MALLET TC	3,38	2,70	0,28	0,22	0,09	0,63	6,30	20,58	0,75	7,86	13,14	66,59	9,58	2,05	1,26 69,09
SÃO JOÃO DO TRIUNFO ME	3,63	3,00	0,28	0,16	0,38	0,84	2,64	11,86	0,51	6,67	241,18	130,49	7,32	0,72	1,53 59,85
SÃO JOÃO DO TRIUNFO TC	3,76	2,20	0,96	0,64	0,11	1,74	2,27	12,31	0,58	7,86	17,40	150,61	6,88	3,23	1,27 36,96
SEARA ME	5,74	0,60	4,50	1,18	0,38	6,07	0,00	3,74	2,61	6,40	67,84	64,19	7,19	1,64	1,38 34,69
SEARA TC	4,49	7,80	3,65	1,48	0,46	5,61	0,30	7,07	0,36	11,25	114,89	163,70	4,36	1,06	1,22 52,25

FONTE: O Autor (2021)

TC – Topo de Catena e ME – Meia encosta; 1- Melich-1; 2 - KCl 1mol L<sup>-1</sup>; 3 – Obtido a partir do método colorimétrico;

## APÊNDICE 2 – FOTOS DA PREPARAÇÃO DO MATERIAL VEGETAL PARA ANÁLISE

FOTO 1 - CORTE DAS MUDAS NO COLO DA PLANTA PARA SEPARAR PARTE AÉREA DE SISTEMA RADICULAR.



FOTO 2 - PARTE AÉREA DE ERVA-MATE COM 1 ANO DE IDADE (a); SEPARAÇÃO DE RAMOS JOVENS DO FUSTE DA PLANTA (b); SEPARAÇÃO DE RAMOS VELHOS DOS NOVOS (c); LINHA VERMELHA PONTILHADA DELIMITA OS PLANOS DE CORTE PARA SEPARAÇÃO DAS PARTES DA PLANTA POR GRAU DE DESENVOLVIMENTO E TIPO DE TECIDO.





FOTO 3 - SEPARAÇÃO DAS FOLHAS DOS RAMOS E DIVISÃO EM FOLHAS JOVENS E FOLHAS MADURAS (A), CRITÉRIO DE COR PARA DETERMINAÇÃO DE FOLHAS JOVENS (VERDE CLARO) DE FOLHAS MADURAS (VERDE ESCURO).

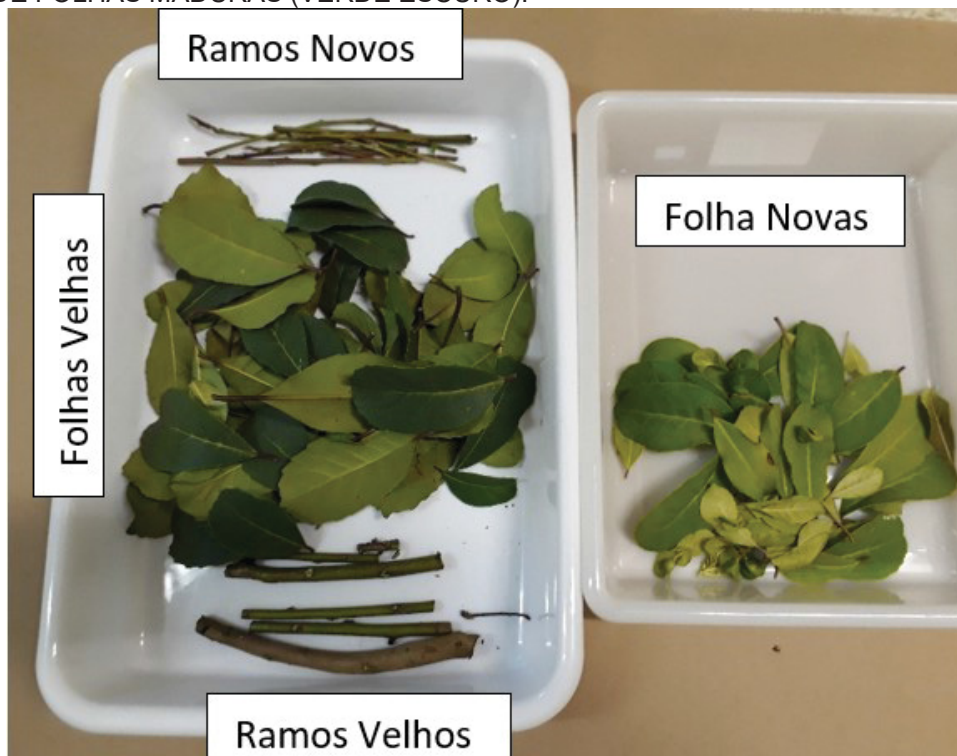


FOTO 4 - CRITÉRIO PARA CLASSIFICAÇÃO EM FOLHAS JOVENS - VERDE CLARO (A) OU PRIMÓRDIOS FOLIARES (b) E FOLHAS MADURAS VERDE ESCURO (a); E RAMOS JOVENS (COLORAÇÃO VERDE E DIÂMETRO INFERIOR A 3 MM) (c), RAMOS MADUROS (PRESENÇA DE TECIDO SUBERIZADO DE COLORAÇÃO MARROM-ACINZENTADO E/OU DIÂMETRO SUPERIOR A 3MM) (d).



FOTO 5 - SEPARAÇÃO DE CASCA (PERIDERME) DO LENHO.



FOTO 6 - ENOVELAMENTO DAS RAÍZES NO SUBSTRATO, A ESQUERDA, E DESTORROAMENTO MANUAL PARA COLETA DAS RAÍZES, A DIREITA.



FOTO 7 - RESGATE DE RAÍZES MISTURADAS AO SUBSTRATO ATRAVÉS DA PENEIRA DE PEDREIRO, A ESQUERDA, E PRÉ-LAVAGEM COM ÁGUA DE TORNEIRA SOB PENEIRA DE 1,5mm, A DIREITA.





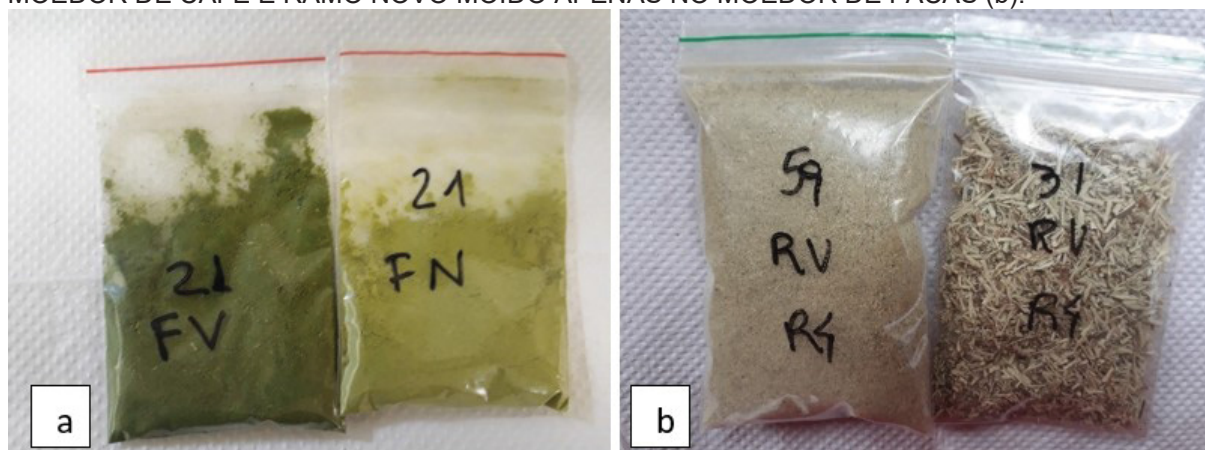
FOTO 8 - RAÍZES EM SOLUÇÃO EDTA-Na 0,2mol l<sup>-1</sup>, A DIREITA, E ENXAGUE DAS RAÍZES COM ÁGUA DEIONIZADA, A DIREITA.



FOTO 9 - MOEDOR DE GRÃOS DE CAFÉ, A ESQUERDA, E MOINHO DE FACAS, A DIREITA.



FOTO 10 - FOLHAS VELHAS (VERDE ESCURO) E FOLHAS NOVAS (VERDE CLARO) FINAMENTE MOÍDAS (a); RAMO NOVO FINAMENTE MOÍDO APÓS PROCESSAMENTO NO MOEDOR DE CAFÉ E RAMO NOVO MOÍDO APENAS NO MOEDOR DE FACAS (b).



### APÊNDICE 3 – ANÁLISES POR FRAÇÃO VEGETAL

TABELA 8 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DA MÉDIA DE MATÉRIA SECA PRODUZIDA POR MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM.

Fonte de Variação	Folha Nova	Folha Madura	Ramo Novo	Ramo Maduro	Raiz	PA Total	Total Geral
Sítios	g.planta <sup>-1</sup>						
Barão do Cotegipe	-	15,19 A	6,20 AB	13,08 A	14,44 AB	39,69 A	54,13 A
ME	-	14,49 a	5,82 a	8,68 a	13,44 a	30,08 a	43,52 a
TC	-	15,88 a	6,58 a	17,48 a	15,45 a	49,30 a	64,75 a
Cascavel	6,35 A	8,62 A	3,71 AB	6,36 AB	10,04 AB	25,03 AB	35,07 AB
ME	7,30 a	8,11 a	4,29 a	7,75 a	11,64 a	27,44 a	39,08 a
TC	5,40 a	9,12 a	3,13 a	4,97 a	8,44 a	22,63 a	31,06 a
Cruz Machado	-	21,30 A	5,76 AB	16,29 A	15,94 AB	46,62 A	62,56 A
ME	-	31,44 a	8,79 a	26,11 a	23,13 a	71,90 a	95,03 a
TC	-	11,15 a	2,73 b	6,46 b	8,75 b	21,33 b	30,08 b
Faxinal do Céu	4,58 A	9,46 A	6,11 AB	6,88 AB	12,71 AB	27,03 AB	39,74 AB
ME	4,27 a	9,60 a	6,40 a	8,36 a	11,79 a	28,62 a	40,41 a
TC	4,90 a	9,31 a	5,83 a	5,40 a	13,64 a	25,43 a	39,07 a
Fernandes Pinheiro	-	12,31 A	7,37 AB	8,22 AB	14,10 AB	29,64 AB	43,74 AB
ME	-	11,16 a	6,10 a	5,11 b	9,98 b	23,42 a	33,39 b
TC	-	13,46 a	8,63 a	11,33 a	18,22 a	35,86 a	54,08 a
Ilópolis	7,83 A	18,28 A	6,61 AB	14,59 A	17,30 A	46,34 A	63,64 A
ME	7,38 a	9,59 a	5,30 a	10,94 a	15,38 a	31,37 a	46,75 b
TC	8,17 a	26,98 a	7,92 a	18,24 a	19,22 a	61,31 a	80,53 a
Mallet	-	10,15 A	4,10 AB	7,03 AB	10,69 AB	25,33 AB	36,02 AB
ME	-	9,36 a	3,51 a	7,81 a	9,64 a	26,34 a	35,98 a
TC	-	10,94 a	4,69 a	6,26 a	11,74 a	24,33 a	36,06 a
São João do Triunfo	-	8,67 A	1,77 C	3,40 B	9,10 B	15,21 B	24,31 B
ME	-	5,58 a	1,43 a	1,58 a	6,69 a	9,79 a	16,47 a
TC	-	11,76 a	2,11 a	5,22 a	11,52 a	20,63 a	32,15 a
Seara	7,85 A	15,01 A	9,78 A	15,39 A	16,03 AB	48,03 A	64,06 A
ME	10,02 a	17,94 a	12,22 a	19,00 a	18,22 a	59,17 a	77,39 a
TC	4,96 a	11,10 a	6,52 a	10,59 a	13,11 a	33,17 b	46,28 a
Posição na Paisagem							
ME	7,23 A	13,03 A	5,98 A	10,59 A	13,32 A	34,23 A	47,56 A
TC	5,91 A	13,36 A	5,31 A	9,52 A	13,34 A	32,65 A	46,00 A

TC – Topo de Catena; ME – Meia Encosta

Letras diferentes e maiúsculas na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Fonte de Variação, letras diferentes e minúsculas na mesma coluna, para o mesmo sítio, indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Interação entre sítio e posição na paisagem.

TABELA 9 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE Ca EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM.

Fonte de Variação	Folha Nova	Folha Madura	Ramo Novo	Ramo Maduro	Lenho	Casca	Raiz
Sítio	Ca (g.kg <sup>-1</sup> )						
Barão do Cotegipe	-	7,18 ABC	5,47 A	3,57 A	1,26 A	15,86 AB	4,84 A
ME	-	7,14 a	6,41 a	4,46 a	1,92 a	19,36 a	7,02 a
TC	-	7,22 a	4,53 b	2,90 a	0,60 b	12,37 b	2,65 b
Cascavel	5,07 A	7,64 AB	4,87 AB	3,86 A	1,02 A	16,76 AB	4,76 A
ME	5,30 a	7,67 a	6,13 a	4,14 a	1,45 a	24,88 a	7,14 a
TC	4,83 a	7,61 a	3,62 a	3,49 a	0,58 b	8,63 b	2,39 b
Cruz Machado	-	6,89 ABC	4,06 AB	3,47 A	0,71 A	12,73 AB	2,81 A
ME	-	8,08 a	4,15 a	3,69 a	0,79 a	13,84 a	2,79 a
TC	-	5,69 b	3,96 a	3,25 a	0,63 a	11,62 a	2,82 a
Faxinal do Céu	3,18 B	5,65 ABC	4,31 AB	3,13 A	0,87 A	13,16 AB	4,61 A
ME	3,08 a	5,51 a	4,34 a	3,00 a	0,93 a	13,26 a	4,84 a
TC	3,28 a	5,78 a	4,28 a	3,25 a	0,81 a	13,07 a	4,38 a
Fernandes Pinheiro	-	5,10 C	4,56 AB	-	0,89 A	12,40 AB	3,52 A
ME	-	5,11 a	4,26 a	-	0,57 b	11,57 a	3,10 b
TC	-	5,10 a	4,85 a	-	1,20 a	13,23 a	3,94 a
Ilópolis	4,27 AB	7,55 AB	4,44 AB	-	0,78 A	12,98 AB	2,80 A
ME	5,29 a	8,10 a	5,04 a	-	0,71 a	12,26 a	2,64 a
TC	3,51 a	6,99 a	3,83 a	-	0,86 a	13,69 a	3,00 a
Mallet	-	5,76 BC	3,79 AB	3,20 A	0,57 A	10,25 B	2,63 A
ME	-	7,51 a	3,56 a	3,12 a	0,57 a	10,28 a	2,56 a
TC	-	4,45 a	4,02 a	3,29 a	0,58 a	10,22 a	2,69 a
São João do Triunfo	-	5,82 ABC	3,93 B	3,67 A	0,74 A	11,10 AB	2,73 A
ME	-	5,15 a	4,47 a	3,49 a	0,84 a	10,43 a	2,86 a
TC	-	6,49 a	3,39 a	3,84 a	0,64 a	11,76 a	2,60 a
Seara	5,25 A	8,12 A	5,29 AB	5,90 A	1,17 A	18,26 A	4,10 A
ME	5,97 a	8,38 a	5,88 a	7,95 a	1,45 a	22,38 a	5,11 a
TC	4,29 a	7,78 a	4,51 a	3,16 a	0,79 a	12,76 b	2,75 a
Posição na Paisagem							
ME	4,89 A	7,00 A	4,91 A	4,27 A	1,02 A	15,36 A	4,23 A
TC	3,96 B	6,30 A	4,10 B	3,29 A	0,74 B	11,90 B	3,03 B

TC – Topo de Catena; ME – Meia Encosta

Letras diferentes e maiúsculas na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Fonte de Variação, letras diferentes e minúsculas na mesma coluna, para o mesmo sítio, indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Interação entre sítio e posição na paisagem.

TABELA 10 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE K EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM.

Fonte de Variação	Folha Nova	Folha Madura	Ramo Novo	Ramo Maduro	Lenho	Casca	Raiz
Sítio	K (g.kg <sup>-1</sup> )						
Barão do Cotegipe	-	16,05 AB	15,20 A	8,01 AB	4,44 AB	12,09 AB	10,45 AB
ME	-	21,06 a	15,86 a	8,06 a	4,89 a	11,65 a	10,89 a
TC	-	11,03 b	14,53 a	7,97 a	3,99 a	12,53 a	10,00 a
Cascavel	21,21 A	15,52 AB	14,43 AB	8,37 A	5,96 A	13,02 A	9,98 AB
ME	22,97 a	19,61 a	17,33 a	8,30 a	7,62 a	12,91 a	11,82 a
TC	19,45 a	11,43 b	11,53 b	8,46 a	4,30 a	13,12 a	8,14 a
Cruz Machado	-	12,79 AB	13,86 AB	7,69 AB	3,71 AB	11,80 AB	8,82 ABC
ME	-	11,71 a	15,06 a	7,72 a	3,35 a	13,27 a	9,13 a
TC	-	13,88 a	12,66 a	7,66 a	4,06 a	10,33 a	8,50 a
Faxinal do Céu	16,74 A	10,71 B	8,95 C	5,39 B	2,79 B	9,21 B	9,16 ABC
ME	16,97 a	9,49 a	9,01 a	5,40 a	2,57 a	8,79 a	8,78 a
TC	16,52 a	11,93 a	8,89 a	5,39 a	3,02 a	9,62 a	9,54 a
Fernandes Pinheiro	-	16,44 A	12,16 ABC	-	4,81 AB	10,21 AB	9,47 ABC
ME	-	15,45 a	11,74 a	-	5,16 a	10,64 a	8,68 a
TC	-	17,19 a	12,58 a	-	4,45 a	9,79 a	10,27 a
Ilópolis	21,71 A	15,87 AB	14,90 AB	-	4,96 AB	13,27 A	11,64 A
ME	21,83 a	14,88 a	13,06 a	-	4,88 a	12,82 a	11,30 a
TC	21,62 a	16,85 a	16,74 a	-	5,05 a	13,71 a	12,08 a
Mallet	-	13,13 AB	11,62 BC	7,18 AB	4,62 AB	11,99 AB	7,04 C
ME	-	14,22 a	12,34 a	7,84 a	5,56 a	13,03 a	6,82 a
TC	-	12,31 a	10,90 a	6,52 a	3,67 a	10,95 a	7,26 a
São João do Triunfo	-	11,46 AB	12,03 ABC	7,72 AB	3,57 AB	9,99 AB	8,26 BC
ME	-	12,56 a	10,10 a	7,16 a	2,74 a	9,51 a	8,11 a
TC	-	10,36 a	13,95 a	8,29 a	4,40 a	10,47 a	8,41 a
Seara	22,08 A	14,86 AB	13,30 AB	9,05 A	4,88 AB	11,67 AB	9,81 ABC
ME	21,55 a	15,35 a	14,06 a	9,98 a	5,40 a	12,38 a	10,17 a
TC	22,78 a	14,21 a	12,29 a	7,81 a	4,20 a	10,72 a	9,32 a
Posição na Paisagem							
ME	20,76 A	14,93 A	13,17 A	7,79 A	4,69 A	11,67 A	9,52 A
TC	19,91 A	13,24 B	12,68 A	7,35 A	4,12 A	11,27 A	9,20 A

TC – Topo de Catena; ME – Meia Encosta

Letras diferentes e maiúsculas na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Fonte de Variação, letras diferentes e minúsculas na mesma coluna, para o mesmo sítio, indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Interação entre sítio e posição na paisagem.

TABELA 11 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE Mg EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM.

Fonte de Variação	Folha Nova	Folha Madura	Ramo Novo	Ramo Maduro	Lenho	Casca	Raiz
Sítio	Mg (g.kg <sup>-1</sup> )						
Barão do Cotegipe	-	7,16 AB	2,88 AB	1,59 A	0,68 ABC	4,88 AB	3,95 ABC
ME	-	6,03 b	2,75 a	1,52 a	0,71 a	4,80 a	3,60 a
TC	-	8,28 a	3,01 a	1,64 a	0,65 a	4,96 a	4,30 a
Cascavel	6,33 A	7,75 A	3,75 A	2,26 A	0,72 ABC	5,89 A	4,78 AB
ME	5,86 a	7,07 a	3,92 a	1,73 a	0,74 a	6,08 a	5,44 a
TC	6,81 a	8,44 a	3,59 a	2,96 a	0,69 a	5,70 a	4,12 a
Cruz Machado	-	7,07 AB	3,22 AB	1,95 A	0,59 BC	5,31 AB	4,57 ABC
ME	-	7,77 a	3,43 a	2,08 a	0,72 a	5,65 a	5,61 a
TC	-	6,38 a	3,01 a	1,81 a	0,47 b	4,96 a	3,53 b
Faxinal do Céu	3,84 C	6,62 AB	2,49 B	1,51 A	0,49 C	4,60 B	3,61 ABC
ME	3,56 a	6,56 a	2,33 a	1,37 a	0,47 a	4,11 b	3,73 a
TC	4,11 a	6,67 a	2,65 a	1,66 a	0,52 a	5,09 a	3,50 a
Fernandes Pinheiro	-	6,61 AB	3,76 A	-	1,00 A	5,72 A	4,49 ABC
ME	-	6,70 a	3,71 a	-	0,89 a	5,82 a	3,90 b
TC	-	6,54 a	3,82 a	-	1,10 a	5,63 a	5,08 a
Ilópolis	4,66 BC	6,01 AB	2,55 B	-	0,52 BC	4,35 B	4,27 ABC
ME	5,45 a	6,45 a	2,82 a	-	0,49 a	4,41 a	4,38 a
TC	4,07 a	5,56 a	2,29 a	-	0,56 a	4,29 a	4,12 a
Mallet	-	5,65 B	2,87 AB	1,75 A	0,64 BC	4,85 AB	3,38 BC
ME	-	6,58 a	2,98 a	1,92 a	0,79 a	5,33 a	3,85 a
TC	-	4,96 a	2,77 a	1,59 a	0,49 a	4,38 a	2,92 a
São João do Triunfo	-	7,19 AB	3,32 AB	2,23 A	0,54 BC	5,11 AB	3,26 C
ME	-	6,36 a	3,02 a	1,90 a	0,55 a	4,53 b	2,57 b
TC	-	8,02 a	3,63 a	2,56 a	0,53 a	5,68 a	3,94 a
Seara	5,91 AB	7,72 A	3,18 AB	2,28 A	0,76 AB	5,45 AB	5,03 A
ME	6,02 a	7,50 a	2,99 a	2,53 a	0,80 a	5,30 a	4,98 a
TC	5,76 a	8,01 a	3,42 a	1,94 b	0,71 a	5,65 a	5,11 a
Posição na Paisagem							
ME	5,21 A	6,79 A	3,10 A	1,88 A	0,68 A	5,11 A	4,23 A
TC	5,15 A	6,95 A	3,12 A	1,97 A	0,63 A	5,13 A	4,04 A

TC – Topo de Catena; ME – Meia Encosta

Letras diferentes e maiúsculas na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Fonte de Variação, letras diferentes e minúsculas na mesma coluna, para o mesmo sítio, indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Interação entre sítio e posição na paisagem.

TABELA 12 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE P EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM.

Fonte de Variação	Folha Nova	Folha Madura	Ramo Novo	Ramo Maduro	Lenho	Casca	Raiz
Sítio	P (g.kg <sup>-1</sup> )						
Barão do Cotegipe	-	0,91 A	1,15 A	0,75 A	0,80 AB	0,81 A	0,98 A
ME	-	1,12 a	1,26 a	0,68 a	0,92 a	0,74 a	0,95 a
TC	-	0,71 b	1,03 a	0,81 a	0,67 a	0,87 a	1,02 a
Cascavel	0,95 A	0,73 A	0,72 B	0,38 B	0,41 BC	0,66 A	0,88 ABC
ME	1,25 a	0,87 a	0,86 a	0,36 a	0,60 a	0,72 a	1,07 a
TC	0,65 a	0,59 b	0,57 a	0,40 a	0,23 a	0,60 a	0,68 a
Cruz Machado	-	0,68 A	0,78 AB	0,40 B	0,28 C	0,70 A	0,68 ABC
ME	-	0,64 a	0,97 a	0,39 a	0,26 a	0,71 a	0,78 a
TC	-	0,72 a	0,59 a	0,42 a	0,29 a	0,68 a	0,58 a
Faxinal do Céu	1,15 A	0,81 A	0,71 B	0,46 AB	0,43 ABC	0,79 A	0,93 AB
ME	1,18 a	0,89 a	0,81 a	0,48 a	0,44 a	0,78 a	0,96 a
TC	1,14 a	0,73 a	0,62 a	0,45 a	0,43 a	0,81 a	0,91 a
Fernandes Pinheiro	-	0,76 A	0,94 AB	-	0,92 A	0,71 A	0,84 ABC
ME	-	0,71 a	0,86 a	-	1,03 a	0,72 a	0,76 a
TC	-	0,80 a	1,02 a	-	0,81 a	0,71 a	0,92 a
Ilópolis	0,95 A	0,69 A	0,82 AB	-	0,45 ABC	0,72 A	0,96 AB
ME	0,79 a	0,64 a	0,84 a	-	0,53 a	0,70 a	1,03 a
TC	1,08 a	0,73 a	0,80 a	-	0,36 a	0,74 a	0,87 a
Mallet	-	0,71 A	0,65 B	0,42 B	0,47 ABC	0,79 A	0,64 C
ME	-	0,57 b	0,58 a	0,36 a	0,44 a	0,88 a	0,59 a
TC	-	0,81 a	0,72 a	0,48 a	0,49 a	0,71 a	0,69 a
São João do Triunfo	-	0,69 A	0,66 B	0,56 AB	0,47 ABC	0,63 A	0,66 BC
ME	-	0,73 a	0,62 a	0,53 a	0,46 a	0,65 a	0,69 a
TC	-	0,64 a	0,70 a	0,59 a	0,48 a	0,61 a	0,63 a
Seara	0,90 A	0,68 A	0,81 AB	0,54 AB	0,45 ABC	0,72 A	0,93 AB
ME	0,94 a	0,72 a	0,88 a	0,55 a	0,45 a	0,78 a	0,99 a
TC	0,85 a	0,63 a	0,72 a	0,51 a	0,46 a	0,63 a	0,85 a
Posição na Paisagem							
ME	1,06 A	0,77 A	0,85 A	0,47 A	0,57 A	0,74 A	0,87 A
TC	0,93 A	0,71 A	0,75 A	0,53 A	0,47 A	0,71 A	0,79 A

TC – Topo de Catena; ME – Meia Encosta

Letras diferentes e maiúsculas na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Fonte de Variação, letras diferentes e minúsculas na mesma coluna, para o mesmo sítio, indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Interação entre sítio e posição na paisagem.



TABELA 13 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE Mn EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM.

Fonte de Variação	Folha Nova	Folha Madura	Ramo Novo	Ramo Maduro	Lenho	Casca	Raiz
Sítio	Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )						
Barão do Cotegipe	-	1.477,88 B	284,18 ABC	198,49 A	126,28 ABC	525,89 BC	186,82 ABCD
ME	-	205,49 b	57,08 b	33,54 b	21,50 b	113,15 b	124,41 b
TC	-	2.750,27 a	511,27 a	322,20 a	231,06 a	938,62 a	249,22 a
Cascavel	966,86 B	1.920,02 B	223,23 BC	171,80 A	95,64 ABC	494,22 BC	129,16 BCD
ME	77,99 a	95,07 b	32,41 b	18,71 b	12,37 b	73,50 b	58,44 a
TC	1.855,73 b	3.744,97 a	414,05 a	375,91 a	178,92 a	914,93 a	199,87 a
Cruz Machado	-	2.586,58 AB	380,87 AB	248,30 A	128,83 AB	671,86 AB	217,87 AB
ME	-	3.947,28 a	571,05 a	357,34 a	190,10 a	953,43 a	309,86 a
TC	-	1.225,89 b	190,69 b	139,25 b	67,56 b	390,29 b	125,87 b
Faxinal do Céu	166,44 B	581,37 B	62,06 C	47,34 A	26,17 C	160,36 C	66,81 D
ME	194,66 a	754,27 a	73,46 a	51,89 a	30,90 a	201,14 a	76,96 a
TC	138,22 a	408,48 a	50,67 a	42,78 a	21,44 b	119,58 a	56,65 a
Fernandes Pinheiro	-	1.016,93 B	174,64 BC	-	63,16 BC	334,99 BC	101,02 BCD
ME	-	1.235,93 a	169,67 a	-	61,48 a	373,89 a	109,28 a
TC	-	852,68 a	179,61 a	-	64,84 a	296,10 a	92,75 a
Ilópolis	2.299,49 A	4.678,39 A	643,35 A	-	250,12 A	1.273,13 A	296,37 A
ME	3.065,50 a	5.723,81 a	769,31 a	-	295,45 a	1.573,37 a	344,82 a
TC	1.724,97 a	3.632,97 b	517,39 a	-	204,79 a	972,88 b	231,76 b
Mallet	-	1.391,81 B	268,54 ABC	183,42 A	103,37 ABC	635,64 ABC	233,81 ABC
ME	-	2.191,05 a	398,38 a	271,47 a	161,23 a	996,64 a	320,03 a
TC	-	792,38 a	138,71 b	95,37 b	45,51 b	274,63 b	147,58 b
São João do Triunfo	-	798,73 B	105,56 BC	85,22 A	35,81 BC	203,64 BC	200,12 CD
ME	-	482,97 b	79,63 a	68,65 a	27,32 b	131,63 b	331,99 a
TC	-	1.114,49 a	131,48 a	101,79 a	44,30 a	275,65 a	68,24 b
Seara	622,89 B	1.602,58 B	176,31 BC	123,34 A	87,03 BC	364,69 BC	110,53 BCD
ME	64,92 b	1.031,10 a	25,99 b	25,79 b	14,97 b	80,62 b	86,85 a
TC	1366,84 a	2.364,56 a	376,73 a	253,41 a	183,10 a	743,46 a	142,11 a
Posição na Paisagem							
ME	703,12 B	1.742,38 A	241,89 B	123,36 B	90,59 B	499,71 A	195,85 A
TC	1.265,08 A	1.862,35 A	276,16 A	183,67 A	113,80 A	541,74 A	143,60 A

TC – Topo de Catena; ME – Meia Encosta

Letras diferentes e maiúsculas na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Fonte de Variação, letras diferentes e minúsculas na mesma coluna, para o mesmo sítio, indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Interação entre sítio e posição na paisagem.

TABELA 14 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE AI EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM.

Fonte de Variação		Folha Nova	Folha Madura	Ramo Novo	Ramo Maduro	Lenho	Casca	Raiz
Sítio		AI (mg.kg <sup>-1</sup> )						
Barão Cotegipe	do	-	137,63 B	95,02 A	51,06 BC	65,99 C	474,97 AB	515,98 C
	ME	-	67,79 b	102,68 a	32,76 a	33,81 a	264,95 b	308,32 a
	TC	-	207,46 a	87,37 a	64,78 a	98,17 a	684,99 a	723,65 a
Cascavel		74,36 B	189,75 AB	103,28 A	57,46 C	58,92 C	390,52 AB	1.145,08 AB
	ME	32,79 b	67,28 b	96,69 a	14,87 a	6,76 b	261,92 a	906,72 a
	TC	115,93 a	312,22 a	109,88 a	114,25 a	111,08 a	519,11 a	1383,44 a
Cruz Machado		-	195,89 AB	114,01 A	99,48 ABC	180,24 AB	497,61 AB	822,45 BC
	ME	-	172,67 a	69,34 b	65,54 a	151,94 a	362,57 a	632,92 a
	TC	-	219,11 a	158,69 a	133,42 a	208,54 a	632,66 a	1.011,98 a
Faxinal Céu	do	150,99 A	273,72 AB	130,71 A	138,36 AB	289,82 A	704,27 A	1.027,28 AB
	ME	164,09 a	326,96 a	122,47 a	127,17 a	349,30 a	739,98 a	1086,02 a
	TC	137,89 a	220,47 a	138,95 a	149,55 a	230,34 a	668,56 a	968,55 a
Fernandes Pinheiro		-	177,85 AB	80,36 A	-	97,57 BC	476,86 AB	1.752,40 A
	ME	-	150,44 a	90,55 a	-	87,28 a	361,94 a	1.532,70 a
	TC	-	198,41 a	70,17 a	-	107,85 a	591,77 a	1.972,10 a
Ilópolis		91,96 B	182,35 AB	144,52 A	-	108,64 BC	400,73 AB	779,50 BC
	ME	103,59 a	183,27 a	231,37 a	-	93,90 a	257,80 b	860,68 a
	TC	83,24 a	181,43 a	57,66 a	-	123,38 a	543,67 a	671,27 a
Mallet		-	326,89 A	104,00 A	144,40 A	127,96 ABC	581,39 AB	1.686,70 A
	ME	-	290,86 a	92,12 a	109,88 a	115,31 a	602,87 a	1.812,82 a
	TC	-	353,91 a	115,87 a	178,92 a	140,61 a	559,91 a	1.560,57 a
São João do Triunfo		-	220,22 AB	146,43 A	110,04 ABC	120,55 BC	453,11 AB	602,22 BC
	ME	-	205,16 a	105,22 a	134,85 a	155,51 a	375,73 a	563,61 a
	TC	-	235,28 a	187,65 a	85,23 a	85,60 a	530,49 a	640,82 a
Seara		83,71 B	222,24 AB	75,48 A	78,80 ABC	65,20 C	342,68 B	1.265,14 AB
	ME	24,68 b	201,67 a	39,76 b	61,26 a	8,47 b	267,49 b	1238,61 a
	TC	162,41 a	249,65 a	123,12 a	102,18 a	140,84 a	442,94 a	1300,53 a
Posição na Paisagem								
ME		79,80 B	183,03 B	105,58 A	77,60 B	111,37 B	388,36 B	993,60 A
TC		122,36 A	241,77 A	116,41 A	120,47 A	138,42 A	578,67 A	1.145,88 A

TC – Topo de Catena; ME – Meia Encosta

Letras diferentes e maiúsculas na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Fonte de Variação, letras diferentes e minúsculas na mesma coluna, para o mesmo sítio, indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Interação entre sítio e posição na paisagem.

TABELA 15 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE Fe EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM.

Fonte de Variação	Folha Nova	Folha Madura	Ramo Novo	Ramo Maduro	Lenho	Casca	Raiz
Sítio	Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )						
Barão do Cotegipe	-	111,71 A	49,80 A	29,39 A	55,21 A	584,64 A	566,22 CD
ME	-	80,60 b	40,60 a	32,84 a	66,07 a	335,39 a	469,43 a
TC	-	142,81 a	58,99 a	26,80 a	44,35 a	833,88 a	663,01 a
Cascavel	50,25 A	120,28 A	42,25 A	30,87 A	53,94 A	443,06 A	1199,30 AB
ME	53,02 a	94,70 a	45,51 a	16,41 a	54,73 a	374,10 a	1.260,32 a
TC	47,48 a	145,87 a	38,99 a	50,16 a	53,16 a	512,03 a	1.138,28 a
Cruz Machado	-	72,84 A	57,82 A	24,16 A	58,93 A	324,23 A	601,96 BCD
ME	-	71,01 a	69,77 a	19,82 a	44,86 a	313,60 a	603,27 a
TC	-	74,67 a	45,87 a	28,50 a	72,99 a	334,86 a	600,65 a
Faxinal do Céu	55,90 A	95,00 A	47,62 A	21,82 A	66,17 A	282,07 A	648,94 ABCD
ME	63,67 a	101,93 a	34,39 a	24,23 a	77,87 a	308,46 a	720,62 a
TC	48,13 a	88,08 a	60,86 a	19,40 a	54,48 a	255,67 a	577,26 a
Fernandes Pinheiro	-	73,49 A	40,31 A	-	32,50 A	253,10 A	903,63 ABC
ME	-	51,96 a	35,08 a	-	24,59 a	178,43 a	519,34 a
TC	-	89,65 a	45,55 a	-	40,40 a	327,76 a	1.287,91 a
Ilópolis	49,66 A	82,35 A	37,02 A	-	62,57 A	351,35 A	317,70 D
ME	47,21 a	76,62 a	41,18 a	-	63,35 a	349,20 a	371,28 a
TC	51,50 a	88,08 a	32,86 a	-	61,79 a	353,51 a	246,26 a
Mallet	-	124,29 A	40,74 A	35,13 A	39,23 A	294,90 A	754,86 ABC
ME	-	132,22 a	40,35 a	25,39 a	31,08 a	295,04 a	822,96 a
TC	-	118,35 a	41,13 a	44,88 a	47,39 a	294,77 a	686,76 a
São João do Triunfo	-	81,96 A	34,45 A	23,67 A	35,73 A	243,32 A	520,56 CD
ME	-	76,88 a	40,05 a	16,57 a	28,59 a	154,25 a	663,81 a
TC	-	87,04 a	28,85 a	30,76 a	42,87 a	332,40 a	377,30 a
Seara	50,17 A	98,83 A	46,01 A	37,77 A	37,40 A	402,65 A	1422,49 A
ME	38,76 a	100,97 a	53,36 a	49,37 a	21,82 a	431,64 a	1.127,74 a
TC	65,37 a	95,98 a	36,20 a	22,31 b	58,19 a	364,01 a	1.815,49 a
Posição na Paisagem							
ME	50,89 A	87,16 A	44,48 A	26,50 A	45,89 B	304,46 B	728,75 A
TC	52,30 A	103,60 A	43,46 A	31,52 A	52,69 A	402,05 A	809,12 A

TC – Topo de Catena; ME – Meia Encosta

Letras diferentes e maiúsculas na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Fonte de Variação, letras diferentes e minúsculas na mesma coluna, para o mesmo sítio, indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Interação entre sítio e posição na paisagem.

TABELA 16 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE Zn EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM.

Fonte de Variação	Folha Nova	Folha Madura	Ramo Novo	Ramo Maduro	Lenho	Casca	Raiz
Sítio	Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )						
Barão do Cotegipe	-	91,42 AB	118,35 A	89,34 A	123,06 A	316,88 A	214,06 A
ME	-	90,52 a	125,68 a	91,60 a	136,56 a	336,45 a	214,92 a
TC	-	92,31 a	111,02 a	87,64 a	109,57 a	297,31 a	213,20 a
Cascavel	40,14 AB	80,21 ABC	72,00 AB	71,89 A	38,03 A	242,89 AB	131,65 CD
ME	15,55 a	31,14 b	41,74 b	28,19 b	20,30 a	177,92 b	95,57 b
TC	64,74 a	129,29 a	102,26 a	130,16 a	55,77 a	307,86 a	167,74 a
Cruz Machado	-	83,52 ABC	100,05 A	93,91 A	76,76 A	368,33 A	213,66 A
ME	-	112,79 a	105,56 a	110,35 a	110,75 a	385,08 a	210,31 a
TC	-	54,25 b	94,55 a	77,48 a	42,77 a	351,59 a	217,02 a
Faxinal do Céu	26,49 B	40,13 BC	70,33 AB	73,66 A	77,76 A	315,81 A	168,54 ABCD
ME	31,36 a	34,75 a	73,96 a	69,41 a	79,51 a	357,27 a	185,26 a
TC	21,63 b	45,50 a	66,69 a	77,92 a	76,01 a	274,35 a	151,81 b
Fernandes Pinheiro	-	45,85 ABC	74,53 AB	-	68,14 A	236,01 AB	141,63 BCD
ME	-	38,82 a	77,08 a	-	47,54 a	236,80 a	112,37 a
TC	-	51,11 a	71,97 a	-	88,74 a	235,22 a	170,88 a
Ilópolis	68,25 A	134,92 A	119,80 A	-	103,19 A	369,94 A	206,29 AB
ME	94,92 a	169,59 a	136,04 a	-	111,37 a	408,68 a	231,89 a
TC	48,25 a	100,24 b	103,56 a	-	95,00 a	331,20 a	172,15 b
Mallet	-	80,35 ABC	97,66 AB	111,37 A	71,87 A	337,46 A	178,51 ABC
ME	-	139,79 a	121,94 a	145,38 a	116,29 a	428,91 a	232,84 a
TC	-	35,77 a	73,39 a	77,36 a	27,45 b	246,01 b	124,18 b
São João do Triunfo	-	33,43 C	48,51 B	51,44 A	36,45 A	179,46 B	96,75 D
ME	-	37,53 a	57,20 a	50,03 a	41,32 a	177,10 a	88,61 a
TC	-	29,32 a	39,82 a	52,85 a	31,58 a	181,81 a	104,89 a
Seara	79,78 AB	178,96 AB	106,16 AB	119,67 A	106,16 A	337,29 A	224,39 AB
ME	29,09 b	61,66 b	52,84 b	77,51 b	64,25 a	223,72 b	167,21 b
TC	147,35 a	335,37 a	177,26 a	175,89 a	162,04 a	488,72 a	300,63 a
Posição na Paisagem							
ME	39,25 B	79,05 A	88,00 A	82,62 A	80,88 A	303,55 A	171,00 A
TC	65,37 A	90,21 A	91,00 A	94,33 A	74,11 A	296,22 A	176,98 A

TC – Topo de Catena; ME – Meia Encosta

Letras diferentes e maiúsculas na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Fonte de Variação, letras diferentes e minúsculas na mesma coluna, para o mesmo sítio, indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Interação entre sítio e posição na paisagem.

TABELA 17 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TEOR MÉDIO DE Cu EM MUDAS DE ERVA-MATE CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL, CONFORME SÍTIO E POSIÇÃO NA PAISAGEM.

Fonte de Variação	Folha Nova	Folha Madura	Ramo Novo	Ramo Maduro	Lenho	Casca	Raiz
Sítio	Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )						
Barão do Cotegipe	-	4,91 A	7,79 A	5,17 A	3,94 AB	15,15 A	22,77 AB
ME	-	4,84 a	7,80 a	5,39 a	3,98 a	14,45 a	25,79 a
TC	-	4,98 a	7,78 a	5,00 a	3,91 a	15,85 a	19,74 a
Cascavel	7,31 A	5,95 A	8,69 A	5,89 A	4,70 AB	12,99 AB	40,68 A
ME	9,46 a	7,26 a	11,89 a	6,48 a	6,88 a	18,45 a	50,03 a
TC	5,16 b	4,64 a	5,49 b	5,09 a	2,53 b	7,53 b	31,33 a
Cruz Machado	-	4,86 A	7,18 AB	4,59 A	3,99 AB	10,73 AB	22,27 AB
ME	-	4,84 a	8,93 a	5,09 a	4,93 a	13,27 a	23,60 a
TC	-	4,87 a	5,43 b	4,09 a	3,05 a	8,19 a	20,93 a
Faxinal do Céu	6,92 A	5,91 A	5,12 AB	3,92 A	3,39 AB	9,76 AB	17,58 B
ME	7,31 a	5,96 a	5,14 a	3,68 a	3,02 a	9,67 a	17,04 a
TC	6,53 a	5,87 a	5,10 a	4,17 a	3,68 a	9,85 a	18,13 a
Fernandes Pinheiro	-	4,60 A	5,90 AB	-	4,59 A	13,79 AB	31,39 A
ME	-	4,33 a	5,88 a	-	4,02 a	14,50 a	32,94 a
TC	-	4,80 a	5,92 a	-	5,16 a	13,07 a	29,84 a
Ilópolis	5,04 A	4,23 A	4,60 B	-	3,02 AB	10,39 AB	18,69 B
ME	4,59 a	4,18 a	5,05 a	-	3,08 a	11,31 a	22,38 a
TC	5,37 a	4,27 a	4,15 a	-	2,98 a	9,47 a	13,77 a
Mallet	-	5,32 A	5,86 AB	4,88 A	3,38 AB	11,18 AB	29,31 AB
ME	-	4,02 a	5,46 a	4,03 a	3,47 a	12,39 a	29,37 a
TC	-	6,30 a	6,26 a	5,72 a	3,29 a	9,97 a	29,24 a
São João do Triunfo	-	5,03 A	5,91 AB	4,52 A	2,45 B	9,34 B	24,01 AB
ME	-	5,00 a	6,61 a	4,02 a	2,28 a	10,44 a	21,81 a
TC	-	5,06 a	5,21 a	5,03 a	2,61 a	8,25 a	26,21 a
Seara	4,71 A	4,95 A	5,44 AB	4,62 A	3,41 AB	11,01 AB	23,55 AB
ME	3,68 b	5,28 a	4,56 a	4,05 a	2,90 b	8,91 a	17,42 b
TC	6,09 a	4,52 a	6,63 a	5,38 a	4,08 a	13,82 a	31,71 a
Posição na Paisagem							
ME	6,37 A	5,13 A	6,81 A	4,67 A	3,89 A	12,60 A	26,71 A
TC	5,77 B	5,05 A	5,75 A	4,90 A	3,46 A	10,57 B	24,65 A

TC – Topo de Catena; ME – Meia Encosta

Letras diferentes e maiúsculas na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Fonte de Variação, letras diferentes e minúsculas na mesma coluna, para o mesmo sítio, indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para Interação entre sítio e posição na paisagem.

APÊNDICE 4 – DADOS BRUTOS

QUADRO 1 - DADOS BRUTOS DE TEOR DE ELEMENTOS EM FOLHAS JOVENS DE MUDAS DE ERVA-MATE (mg kg<sup>-1</sup>) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL (CONTINUA)

Sítio	Posição na Paisagem	Repetição	S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
			(mg kg <sup>-1</sup> )											
Barão do Cotejipe	Topo de Catena	1	938,62	88,09	24,40	3199,85	6,55	38,15	20530,63	4498,04	1910,47	1015,39	664,69	52,37
Barão do Cotejipe	Topo de Catena	2	661,43	73,72	53,11	4220,91	5,40	43,08	20309,18	5921,19	1266,90	699,84	599,25	38,00
Barão do Cotejipe	Topo de Catena	3	1116,50	77,10	23,47	3174,34	9,33	44,01	21267,89	4619,57	1189,90	899,50	404,60	35,08
Barão do Cotejipe	Topo de Catena	4	858,76	89,50	42,86	3676,77	4,90	60,49	19028,01	5199,96	971,52	881,89	452,54	41,92
Barão do Cotejipe	Meia Encosta	1	849,00	16,66	4,57	2197,73	8,19	39,71	23665,59	3437,59	63,34	1234,20	155,62	40,43
Cascavel	Topo de Catena	1	988,68	113,92	46,40	5034,65	6,52	53,11	20781,89	7478,61	1381,20	665,17	363,19	46,61
Cascavel	Topo de Catena	2	1594,84	136,88	23,69	4743,36	4,08	50,38	22710,69	5905,55	2436,56	647,76	642,68	118,77
Cascavel	Topo de Catena	3	948,83	80,19	34,44	4340,05	4,93	30,85	19439,54	5995,94	1771,29	688,95	449,46	45,18
Cascavel	Topo de Catena	4	869,77	132,74	66,12	5238,90	5,10	55,58	14878,95	7842,52	1833,87	613,77	670,23	48,39
Cascavel	Meia Encosta	1	1325,74	18,87	19,96	5179,29	5,94	42,78	24496,58	5591,74	82,11	801,79	363,10	6,99
Cascavel	Meia Encosta	2	2269,92	16,34	4,50	2821,55	14,49	37,61	26952,49	4173,07	38,55	2493,22	292,82	27,52
Cascavel	Meia Encosta	3	1314,93	63,43	21,78	7569,26	8,37	82,69	18755,67	6837,56	117,85	679,85	443,59	10,40
Cascavel	Meia Encosta	4	1411,07	32,51	15,07	5651,97	9,06	49,00	21692,57	6847,66	73,46	1026,30	336,57	17,29
Cruz Machado	Meia Encosta	1	835,78	80,45	24,44	3954,48	6,79	35,64	17544,56	5419,47	1538,70	904,05	489,76	52,22
Cruz Machado	Meia Encosta	2	858,25	104,69	35,56	4664,06	5,45	35,01	17520,15	5814,19	1942,26	853,67	540,64	72,71
Cruz Machado	Meia Encosta	4	995,87	122,83	61,15	6365,25	6,15	44,67	14524,57	7076,75	2430,73	643,88	628,33	79,50
Cruz Machado	Topo de Catena	1	1146,04	100,45	17,90	3056,47	7,28	84,61	23649,96	4560,55	447,43	991,35	214,43	57,16
Cruz Machado	Topo de Catena	2	1063,82	97,50	9,75	2093,13	11,85	43,26	23197,09	3383,58	290,99	1209,26	226,63	29,36
Faxinal do Céu	Topo de Catena	1	742,20	145,50	29,41	3183,59	3,49	29,08	15025,74	4314,24	123,70	779,20	503,47	11,79
Faxinal do Céu	Topo de Catena	2	1301,89	126,41	8,05	1663,81	12,23	59,52	23092,46	3331,11	115,31	2220,51	291,68	40,11
Faxinal do Céu	Topo de Catena	3	905,33	145,56	31,56	4452,91	4,82	52,18	15132,83	4468,68	142,56	749,74	584,57	26,50
Faxinal do Céu	Topo de Catena	4	778,48	134,07	31,11	3824,87	5,59	51,74	12833,50	4337,14	171,31	793,36	648,14	8,11
Faxinal do Céu	Meia Encosta	1	1250,10	106,78	25,32	3553,59	7,95	46,37	20510,98	4212,48	138,61	1185,33	302,53	38,83
Faxinal do Céu	Meia Encosta	2	819,68	169,20	39,23	3362,41	5,24	62,96	12563,10	3831,73	260,44	1204,07	630,58	24,21
Faxinal do Céu	Meia Encosta	3	858,25	180,78	23,60	2401,47	4,77	57,12	13665,42	2844,17	157,53	907,11	648,50	14,37

QUADRO 1 – CONCLUSÃO

Sítio	Posição na Paisagem	Repetição	(mg kg <sup>-1</sup> )										P	Si	Zn
			S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn				
Faxinal do Céu	Meia Encosta	4	998,73	199,61	23,60	3015,01	11,27	88,21	21126,55	3350,63	222,06	1411,69	393,67	48,04	
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	2	967,52	83,06	18,14	3568,98	8,89	41,20	18762,53	5049,15	469,10	963,71	370,23	50,88	
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	3	812,96	70,14	33,67	4004,28	3,79	38,33	19048,39	5893,86	379,06	866,48	377,81	39,28	
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	1	948,75	187,16	33,73	3121,22	3,87	111,37	13797,37	5654,70	567,77	827,03	488,44	16,72	
Ilópolis	Meia Encosta	2	706,73	85,94	40,88	3903,86	3,85	34,66	19475,13	4401,08	2310,90	977,62	577,12	81,46	
Ilópolis	Meia Encosta	3	946,41	104,96	74,30	6608,24	5,11	45,09	22025,93	6137,21	4075,19	685,83	914,17	75,54	
Ilópolis	Meia Encosta	4	1060,99	119,89	31,50	5371,81	4,81	61,89	23990,85	5816,64	2810,42	699,35	666,05	127,74	
Ilópolis	Topo de Catena	1	1347,80	90,06	15,96	3579,46	8,16	67,07	24368,54	3880,26	2373,38	1552,56	384,47	80,19	
Ilópolis	Topo de Catena	2	1003,84	81,87	12,31	2845,97	4,13	38,85	23178,49	3791,71	1016,84	1129,81	647,76	29,92	
Ilópolis	Topo de Catena	3	817,60	55,64	18,93	3050,04	3,77	42,29	19322,72	3193,78	1548,91	813,97	620,75	33,85	
Ilópolis	Topo de Catena	4	947,30	105,38	33,44	4578,47	5,43	57,80	19615,18	5421,17	1960,75	816,53	696,59	49,04	
Mallet	Topo de Catena	1	1608,18	145,73	16,40	2257,14	13,22	53,50	27009,17	3584,89	234,86	1805,85	272,84	45,71	
Mallet	Topo de Catena	4	765,23	137,35	24,69	2838,72	6,63	39,75	18505,03	3170,73	233,60	824,42	577,87	20,24	
Mallet	Meia Encosta	1	1076,38	108,02	20,31	2135,66	6,86	44,30	19685,25	3501,85	1098,53	1181,75	442,75	54,97	
Mallet	Meia Encosta	2	866,95	97,33	23,43	2866,56	4,59	49,67	17157,71	3977,40	1072,32	574,78	376,92	52,67	
Mallet	Meia Encosta	3	947,02	223,56	31,00	4086,24	3,90	101,12	17498,98	5487,72	1774,13	607,02	901,65	109,44	
Mallet	Meia Encosta	4	772,07	156,17	26,55	4846,61	4,43	50,34	19696,28	5395,42	1676,91	548,52	642,73	89,73	
São João do Triunfo	Topo de Catena	1	1395,40	136,81	9,27	2280,45	6,76	84,62	22843,09	4630,61	356,70	1593,36	199,05	30,30	
São João do Triunfo	Topo de Catena	2	826,07	84,15	16,06	2647,90	2,98	51,10	17321,82	3859,09	452,53	591,79	208,29	41,77	
São João do Triunfo	Topo de Catena	4	1256,10	44,61	14,67	2983,74	8,37	31,47	22709,70	4553,42	245,10	1139,05	159,55	39,06	
São João do Triunfo	Meia Encosta	3	1102,99	153,58	38,09	4460,16	4,95	64,33	16851,72	5554,58	254,79	702,44	424,77	4,48	
São João do Triunfo	Meia Encosta	4	1385,15	111,42	26,06	3042,43	6,39	63,75	21068,97	3943,23	177,33	1212,48	184,70	25,51	
Seara	Topo de Catena	1	842,23	162,86	31,29	4578,06	4,29	59,11	19888,85	5908,01	1334,99	653,77	653,13	163,74	
Seara	Topo de Catena	2	995,63	196,67	36,20	4951,60	6,96	93,73	23312,83	6470,81	1522,39	977,42	647,00	212,31	
Seara	Topo de Catena	3	1085,77	127,68	14,90	3340,04	7,01	43,28	25124,67	4904,90	1243,15	917,94	448,46	66,01	
Seara	Meia Encosta	1	974,68	29,30	12,61	5835,81	3,74	42,71	22320,79	5935,19	44,81	835,09	440,37	28,51	
Seara	Meia Encosta	2	896,22	31,40	19,24	6701,71	4,53	41,67	18649,64	6509,50	86,98	841,51	432,27	30,56	
Seara	Meia Encosta	3	1093,72	17,57	14,51	5541,45	2,98	32,19	20670,97	5983,24	81,98	1089,38	453,38	21,12	
Seara	Meia Encosta	4	1264,38	20,45	11,84	5794,04	3,46	38,47	24564,50	5660,23	45,92	1003,94	381,57	36,18	



QUADRO 2 - DADOS BRUTOS DE TEOR DE ELEMENTOS EM FOLHAS MADURAS DE MUDAS DE ERVA-MATE (mg kg<sup>-1</sup>) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL (CONTINUA)

Sítio	Posição na paisagem	Repetição	(mg kg <sup>-1</sup> )											
			S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	1	1081,52	75,15	20,68	8747,48	3,40	97,22	19339,61	7570,53	112,68	1017,77	0,63	46,69
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	3	1030,58	54,46	30,84	5187,32	6,20	66,41	23526,14	4787,99	170,98	1257,66	0,44	57,06
Barão do Cotegipe	Topo da Catena	4	1130,98	161,01	72,51	7021,66	4,59	105,29	11156,41	8572,10	1555,55	987,55	0,69	78,61
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	4	1051,55	78,54	21,72	5671,59	4,78	85,06	19813,66	5388,79	274,22	1284,17	0,43	80,52
Barão do Cotegipe	Topo da Catena	2	1124,17	161,09	69,46	6812,85	5,19	107,42	9804,40	8146,30	2274,62	755,64	0,95	90,39
Barão do Cotegipe	Topo da Catena	1	1261,52	332,50	61,58	7590,51	5,07	169,44	11928,68	8529,80	3902,05	489,28	1,12	93,22
Barão do Cotegipe	Topo da Catena	3	946,99	175,24	53,78	7461,16	5,08	189,09	11230,00	7881,76	3268,86	609,84	0,87	107,04
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	2	1566,59	63,55	58,26	8953,45	5,00	73,73	21561,54	6378,96	264,06	902,72	0,67	177,82
Cascavel	Meia Encosta	2	2139,51	55,93	22,37	8706,96	7,78	81,81	17927,59	7315,97	96,19	778,51	0,54	16,78
Cascavel	Meia Encosta	4	1141,45	114,50	19,49	7753,34	7,59	137,85	20142,51	7450,34	114,29	946,74	0,50	29,46
Cascavel	Meia Encosta	3	1310,70	34,96	16,48	5926,81	9,68	56,05	21528,91	6583,61	77,97	963,35	0,41	32,81
Cascavel	Meia Encosta	1	1333,83	63,73	19,66	8294,70	3,97	103,08	18843,54	6936,47	91,82	780,15	0,51	45,50
Cascavel	Topo da Catena	3	908,65	171,11	71,34	8495,16	5,55	94,91	11208,71	8606,05	3216,42	632,64	0,77	115,00
Cascavel	Topo da Catena	4	1344,66	330,32	61,34	7504,69	4,13	133,75	11407,11	9651,79	3533,57	600,75	0,91	117,13
Cascavel	Topo da Catena	2	1496,89	507,24	78,16	9230,71	3,87	279,01	9572,84	9101,42	5095,74	523,62	0,74	131,67
Cascavel	Topo da Catena	1	1187,47	240,19	61,57	5197,10	5,00	75,82	13514,25	6392,40	3134,16	610,51	0,89	153,35
Cruz Machado	Topo da Catena	2	1178,17	276,72	46,53	5084,48	4,97	89,67	10568,63	5991,11	1308,64	660,43	0,90	23,43
Cruz Machado	Topo da Catena	1	783,13	148,24	46,35	6849,71	4,59	52,53	13916,17	8311,46	799,29	885,00	0,80	56,37
Cruz Machado	Topo da Catena	3	1435,18	227,85	35,41	5742,83	3,83	71,78	15251,57	5778,81	1691,86	594,44	0,79	67,28
Cruz Machado	Topo da Catena	4	1649,84	223,65	24,45	5090,86	6,08	84,68	15781,63	5421,14	1103,76	746,60	0,90	69,93
Cruz Machado	Meia Encosta	3	735,19	141,02	46,08	6535,75	2,67	39,38	13422,77	5866,60	5350,32	550,64	0,59	70,78
Cruz Machado	Meia Encosta	1	1095,83	207,57	87,96	8485,52	6,66	128,77	10004,34	9364,96	2781,25	668,24	0,94	78,98
Cruz Machado	Meia Encosta	4	912,56	169,12	65,70	8852,13	5,38	65,45	9884,21	8184,30	3646,88	668,85	0,89	143,99
Cruz Machado	Meia Encosta	2	1003,75	172,98	50,30	8441,24	4,68	50,45	13521,49	7675,67	4010,65	654,79	0,96	157,43



QUADRO 2 – CONTINUAÇÃO

Sítio	Posição na paisagem	Repetição	(mg kg <sup>-1</sup> )											P	Si	Zn
			S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn					
Faxinal do Céu	Topo da Catena	1	923,98	276,84	70,02	6301,27	4,27	65,94	8965,55	7473,56	722,02	574,73	1,04			13,21
Faxinal do Céu	Meia Encosta	1	1796,12	209,00	49,68	6571,48	5,51	97,08	9427,11	9166,51	1447,73	618,96	0,82			21,08
Faxinal do Céu	Topo da Catena	4	847,89	230,00	48,94	4631,17	5,29	80,01	8997,63	5631,83	358,88	746,48	0,85			22,50
Faxinal do Céu	Topo da Catena	2	1236,54	299,43	58,27	6008,12	8,64	117,95	12400,64	7192,13	360,63	961,61	0,96			33,99
Faxinal do Céu	Meia Encosta	2	945,21	326,69	47,03	4122,88	5,56	98,25	8458,63	4539,72	424,96	1135,56	1,00			35,73
Faxinal do Céu	Meia Encosta	3	954,27	455,02	66,60	4824,89	4,62	99,53	6175,95	5864,23	739,62	713,78	0,82			39,21
Faxinal do Céu	Meia Encosta	4	1152,92	317,14	71,98	6530,00	8,17	112,87	13890,89	6686,82	404,75	1094,53	0,96			43,00
Faxinal do Céu	Topo da Catena	3	809,02	75,61	31,56	6188,76	5,27	88,40	17338,06	6366,09	192,39	635,12	0,60			112,27
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	4	1162,26	196,58	36,75	5207,75	3,91	51,19	14913,53	7329,13	1490,66	869,69	0,83			31,77
Fernandes Pinheiro	Topo da Catena	4	1055,78	111,21	23,97	4832,07	4,08	49,37	18431,90	6965,31	686,21	939,31	0,56			35,45
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	2	1399,96	136,12	39,01	5988,92	3,85	50,82	13061,30	7137,89	1277,49	657,75	0,64			37,25
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	3	1499,77	118,61	30,97	4134,14	5,22	53,86	18383,10	5640,71	939,66	613,47	0,58			47,44
Fernandes Pinheiro	Topo da Catena	1	910,22	239,99	61,49	4435,83	4,16	143,38	14717,61	5987,28	494,98	829,60	0,69			50,45
Fernandes Pinheiro	Topo da Catena	2	856,41	131,12	27,11	5614,70	4,12	57,50	16691,52	6915,20	785,90	648,77	0,71			56,56
Fernandes Pinheiro	Topo da Catena	3	1126,25	311,30	46,17	5513,42	6,83	108,33	18904,76	6295,28	1443,62	795,47	0,93			62,01
Ilópolis	Topo da Catena	4	882,76	210,98	50,19	6990,87	5,13	108,02	14215,62	6125,26	3583,97	792,52	0,86			78,95
Ilópolis	Topo da Catena	3	976,26	136,12	55,73	7014,35	3,39	57,27	13854,82	4853,49	3773,23	653,89	0,93			85,47
Ilópolis	Topo da Catena	2	853,84	195,93	46,45	7446,69	3,07	93,42	15819,49	5978,29	3604,67	685,51	1,02			101,20
Ilópolis	Meia Encosta	2	681,10	170,75	55,10	6601,27	2,96	65,92	9682,73	5794,25	5640,28	614,11	0,75			118,08
Ilópolis	Topo da Catena	1	1070,02	182,68	42,14	6522,52	5,51	93,60	23525,88	5289,47	3569,98	795,02	1,00			135,35
Ilópolis	Meia Encosta	1	1167,57	141,61	62,39	10809,51	5,00	57,52	14213,96	7843,02	4812,73	601,36	0,98			176,00
Ilópolis	Meia Encosta	4	1334,38	218,77	40,57	7021,52	4,53	110,10	19615,31	5956,85	5757,79	814,89	0,89			190,65
Ilópolis	Meia Encosta	3	1118,20	201,95	52,79	7959,61	4,24	72,97	16013,33	6199,86	6684,42	546,62	0,76			193,62
Mallet	Meia Encosta	1	1400,25	116,86	44,10	10877,90	4,58	141,73	16911,98	7436,77	102,99	600,52	0,82			13,48
Mallet	Topo da Catena	3	1238,81	345,99	47,87	3782,37	6,70	114,62	14633,16	4401,55	817,44	895,09	0,92			24,83

QUADRO 2 – CONCLUSÃO

Sítio	Posição na paisagem	Repetição	S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
			(mg kg <sup>-1</sup> )											
Mallet	Topo da Catena	4	1276,65	397,47	60,22	5157,79	7,80	165,99	9495,82	5985,23	1050,28	717,97	0,93	25,52
Mallet	Topo da Catena	2	1259,56	358,24	32,04	2997,78	6,20	79,84	14269,85	3573,14	961,18	946,59	1,00	25,84
Mallet	Topo da Catena	1	957,44	313,94	47,12	5881,83	4,49	112,95	10839,35	5861,76	340,64	677,88	1,03	66,89
Mallet	Meia Encosta	3	929,95	428,95	58,81	5320,52	3,98	175,97	12529,52	6163,98	3070,07	585,75	0,75	198,06
Mallet	Meia Encosta	4	960,66	326,78	55,50	6327,64	3,49	78,96	13214,20	6127,37	3400,07	530,07	0,90	207,82
São João do Triunfo	Topo da Catena	3	1367,94	229,47	42,30	6428,47	4,71	79,78	12877,75	8830,01	1180,40	629,71	0,77	20,51
São João do Triunfo	Topo da Catena	2	568,12	222,02	44,34	5206,98	1,67	84,59	8536,63	6804,50	1640,56	433,05	0,63	21,78
São João do Triunfo	Meia Encosta	3	982,93	279,63	52,78	5464,95	4,83	91,90	9764,13	6506,01	322,86	700,78	0,87	26,33
São João do Triunfo	Topo da Catena	4	1732,76	173,66	51,64	7328,75	6,43	81,19	9491,80	9399,46	1014,05	732,57	0,74	28,51
São João do Triunfo	Meia Encosta	4	1179,37	198,49	61,12	5196,51	5,54	79,82	13307,02	5991,19	518,44	789,20	0,68	29,16
São João do Triunfo	Meia Encosta	2	928,83	204,16	39,23	3732,43	5,03	64,05	11461,18	5945,12	248,88	800,97	0,70	34,64
São João do Triunfo	Topo da Catena	1	1513,62	315,96	63,42	7012,98	7,44	102,60	10552,00	7041,50	622,95	775,46	1,06	46,47
São João do Triunfo	Meia Encosta	1	1180,99	138,37	34,79	6213,78	4,62	71,73	15720,45	6988,55	841,68	625,09	0,58	59,99
Seara	Meia Encosta	3	1385,99	469,85	71,06	6120,98	8,85	156,52	12238,62	6488,28	1045,09	753,44	0,74	26,77
Seara	Meia Encosta	4	1085,71	60,71	19,37	7871,13	2,85	72,43	18982,75	6845,72	98,84	779,61	0,47	53,95
Seara	Meia Encosta	2	958,89	46,14	26,65	12519,32	4,00	61,39	13648,06	7904,80	136,56	735,62	0,49	58,90
Seara	Meia Encosta	1	1595,27	229,98	51,83	7014,81	5,41	113,54	16535,47	8764,17	2843,93	600,85	0,86	107,01
Seara	Topo da Catena	3	937,78	229,01	50,18	8844,81	4,20	81,06	15238,41	8356,18	2388,20	561,98	0,91	280,76
Seara	Topo da Catena	2	1004,29	223,31	38,15	6968,05	5,91	79,15	17444,56	7756,41	2406,12	874,43	0,92	351,60
Seara	Topo da Catena	1	935,50	296,62	41,54	7534,58	3,44	127,73	9937,84	7918,57	2299,36	451,16	0,93	373,76

QUADRO 3 - DADOS BRUTOS DE TEOR DE ELEMENTOS EM RAMOS NOVOS DE MUDAS DE ERVA-MATE (mg kg<sup>-1</sup>) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL (CONTINUA)

Sítio	Posição na paisagem	Repetição	S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
(mg kg <sup>-1</sup> )														
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	1	1043,29	61,58	59,30	3862,69	6,75	34,36	14192,42	2509,27	421,58	1032,25	28,89	95,40
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	2	797,88	76,82	62,94	4052,29	6,89	40,72	14294,10	3316,15	753,28	869,33	117,07	106,93
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	3	1065,13	112,25	93,37	5665,76	10,23	90,46	16124,94	3788,71	550,69	1212,98	104,01	150,40
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	4	832,83	98,82	88,49	4544,17	7,25	70,42	13525,81	2422,26	319,53	1020,70	62,14	91,36
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	1	809,73	54,49	54,60	5419,74	8,11	38,79	16880,70	2600,34	35,08	1117,16	86,02	126,41
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	2	1261,34	287,72	65,39	7126,89	4,94	45,04	16115,47	2280,17	39,13	890,27	88,46	161,58
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	3	1093,87	33,90	62,15	7740,37	9,74	44,57	16779,95	2750,42	76,11	1715,56	27,15	126,92
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	4	968,31	34,61	48,25	5356,82	8,39	34,01	13660,69	3359,72	78,01	1305,63	17,67	87,80
Cascavel	Topo de Catena	1	1225,67	99,27	64,32	3477,51	6,12	30,13	12858,48	3942,23	321,55	845,22	70,39	94,20
Cascavel	Topo de Catena	2	793,10	92,51	41,62	3496,83	4,07	25,89	11955,46	2834,14	489,35	384,15	21,12	107,31
Cascavel	Topo de Catena	3	912,17	107,44	62,69	3466,00	5,60	54,67	12486,31	3445,40	459,40	608,50	29,95	99,06
Cascavel	Topo de Catena	4	751,02	140,30	72,12	4034,53	6,17	45,26	8810,39	4122,31	385,91	456,07	66,61	108,48
Cascavel	Meia Encosta	1	1325,97	66,52	43,97	5862,46	7,28	55,47	18248,33	3502,52	46,88	547,99	119,00	48,84
Cascavel	Meia Encosta	2	1591,41	62,05	32,84	6936,53	13,02	50,66	20933,83	3505,67	19,35	945,11	52,31	37,20
Cascavel	Meia Encosta	3	1123,20	54,36	34,51	5650,79	13,24	27,93	13716,85	3189,47	27,72	619,61	1,57	39,26
Cascavel	Meia Encosta	4	1607,24	203,83	42,44	6065,33	14,03	47,97	16415,10	5476,93	35,70	1314,12	33,94	41,65
Cruz Machado	Meia Encosta	1	1038,09	43,19	62,42	3478,10	7,34	159,64	14375,36	2484,23	399,30	961,15	71,62	92,48
Cruz Machado	Meia Encosta	2	1059,97	68,19	64,88	4092,13	9,22	45,68	17265,91	2806,30	559,70	1219,30	35,52	82,81
Cruz Machado	Meia Encosta	3	1395,52	69,08	78,76	4148,62	9,15	34,09	16431,33	3888,38	787,14	994,24	36,92	140,93
Cruz Machado	Meia Encosta	4	1122,15	96,90	95,96	4891,32	10,02	39,67	12147,82	4540,23	538,06	717,63	81,41	106,04
Cruz Machado	Topo de Catena	1	808,87	70,48	46,51	2630,19	4,63	20,57	14165,79	1957,91	98,82	483,72	65,42	84,98
Cruz Machado	Topo de Catena	2	843,49	197,70	62,17	4450,30	6,96	70,34	12899,94	3408,90	164,05	616,33	56,97	86,54
Cruz Machado	Topo de Catena	3	1086,35	221,66	53,24	4399,88	4,03	46,17	9835,28	3039,64	246,84	414,96	46,66	109,64
Cruz Machado	Topo de Catena	4	1448,42	144,91	58,26	4370,89	6,10	46,41	13727,22	3634,41	253,04	857,69	77,38	97,02
Faxinal do Céu	Topo de Catena	1	550,95	117,08	58,73	4093,19	4,21	105,13	7934,63	2774,14	38,32	432,69	59,84	39,70
Faxinal do Céu	Topo de Catena	2	810,25	153,54	64,66	5589,64	8,00	64,98	11190,85	3137,46	53,73	935,21	121,37	99,28
Faxinal do Céu	Topo de Catena	3	654,15	182,30	57,59	4049,30	3,61	43,70	8672,58	2502,53	48,60	598,53	84,07	73,31
Faxinal do Céu	Topo de Catena	4	543,60	102,89	52,92	3375,63	4,60	29,62	7776,85	2202,93	62,01	518,05	15,42	54,48

QUADRO 3 – CONTINUAÇÃO

Sítio	Posição na paisagem	Repetição	S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
			(mg kg <sup>-1</sup> )											
Faxinal do Céu	Meia Encosta	1	931,66	84,06	48,62	3016,49	4,58	23,89	10819,77	1949,18	43,55	1128,72	62,31	44,34
Faxinal do Céu	Meia Encosta	2	579,30	144,77	97,10	5573,61	5,12	44,97	6747,58	2988,76	121,37	713,10	40,82	105,88
Faxinal do Céu	Meia Encosta	3	529,30	112,89	68,03	3739,78	3,99	31,36	6367,18	2044,18	51,48	544,35	26,99	65,06
Faxinal do Céu	Meia Encosta	4	694,65	148,17	90,16	5039,46	6,86	37,31	12088,78	2332,23	77,43	841,17	38,87	80,56
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	1	991,39	66,84	50,95	5686,97	5,80	41,70	13232,95	4044,45	158,85	1217,12	56,67	88,54
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	2	1175,06	79,53	49,63	5244,22	5,24	44,01	12262,49	4465,25	229,53	987,10	58,80	76,30
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	3	824,56	85,68	63,88	4146,56	7,50	67,98	10863,64	3197,77	104,63	799,52	38,17	67,15
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	4	974,93	48,63	47,07	4319,66	5,12	28,50	13958,40	3561,30	225,44	1060,51	16,53	55,90
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	1	856,48	75,90	63,04	4386,07	7,20	35,20	10544,42	3949,47	163,68	724,75	23,87	69,35
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	2	942,13	87,37	44,43	5185,18	4,90	38,08	13493,28	3978,86	226,54	1102,31	29,84	81,26
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	3	1203,18	111,81	47,31	3562,83	5,05	33,29	11107,03	3125,20	125,82	907,09	55,00	95,07
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	4	944,28	87,13	55,58	3922,27	6,37	33,74	11833,35	3778,52	162,64	699,73	32,04	62,62
Ilópolis	Meia Encosta	1	684,15	58,84	58,90	5047,82	3,31	43,79	13432,95	2869,18	729,09	733,72	66,60	108,51
Ilópolis	Meia Encosta	2	554,60	54,22	55,75	3507,43	3,91	22,59	8066,82	1571,94	508,69	520,21	8,46	134,33
Ilópolis	Meia Encosta	3	811,37	89,81	113,53	6596,61	5,85	55,62	13905,70	3226,88	848,10	741,63	99,73	151,27
Ilópolis	Meia Encosta	4	1391,11	72,62	85,17	5004,84	7,12	42,72	16852,46	3617,60	991,35	1355,96	69,35	150,06
Ilópolis	Topo de Catena	1	1098,03	67,09	47,58	3980,44	4,31	28,97	16363,32	2864,21	633,20	752,27	76,32	169,13
Ilópolis	Topo de Catena	2	1234,12	42,60	43,15	3584,22	4,46	25,60	18054,54	2562,58	467,32	985,46	49,68	93,67
Ilópolis	Topo de Catena	3	807,23	72,77	42,55	3698,03	4,24	36,59	15173,82	1975,40	336,46	781,60	24,72	91,82
Ilópolis	Topo de Catena	4	1074,99	48,20	59,25	4060,93	3,59	40,27	17356,81	1745,85	632,58	681,51	3,83	59,63
Mallet	Topo de Catena	1	859,04	109,56	71,17	3923,74	8,09	40,71	14226,90	2841,15	98,72	760,02	120,58	60,51
Mallet	Topo de Catena	2	759,62	115,70	80,38	4057,40	5,21	34,55	10732,19	3199,87	233,95	915,55	32,96	75,48
Mallet	Topo de Catena	3	731,23	160,10	89,03	4777,93	5,54	49,70	9398,97	3098,49	136,70	659,08	54,48	94,50
Mallet	Topo de Catena	4	512,14	78,12	63,07	3316,12	6,19	39,56	9241,01	1927,39	85,46	529,17	101,46	63,06
Mallet	Meia Encosta	1	906,83	55,99	59,21	3207,42	6,99	33,71	15854,17	3220,50	522,99	947,80	86,60	64,24
Mallet	Meia Encosta	2	748,15	56,20	55,03	2683,21	5,67	31,98	11727,90	1970,85	246,70	446,22	78,82	113,83
Mallet	Meia Encosta	3	904,92	155,46	67,18	4470,17	5,41	66,53	11071,16	3935,45	453,69	488,16	68,79	185,64
Mallet	Meia Encosta	4	653,36	100,83	57,80	3895,12	3,79	29,19	10712,37	2786,58	370,13	424,95	20,08	124,05
São João do Triunfo	Topo de Catena	1	1187,21	594,18	51,82	3479,17	6,21	34,44	17138,73	4461,24	206,75	915,13	65,41	48,55





QUADRO 4 – CONCLUSÃO

Sítio	Posição na Paisagem	Repetição	S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
			(mg kg <sup>-1</sup> )											
Ilópolis	Topo da Catena	3	676,44	230,73	68,05	5873,01	3,22	32,56	11624,92	2194,34	638,57	371,52	22,56	134,87
Ilópolis	Topo da Catena	4	623,85	109,53	52,51	4118,63	4,70	32,22	9371,01	1915,18	372,40	640,78	16,22	102,98
Mallet	Topo da Catena	1	327,75	109,32	33,83	2573,06	4,25	17,57	6541,71	962,91	42,50	297,93	7,04	32,68
Mallet	Topo da Catena	2	512,24	158,10	62,30	3020,58	5,35	29,14	6859,68	1761,07	136,49	792,19	17,94	89,91
Mallet	Topo da Catena	3	560,61	324,36	81,42	4779,38	8,77	102,05	6917,31	2452,60	136,24	501,16	117,94	130,59
Mallet	Topo da Catena	4	367,41	123,91	46,55	2771,94	4,53	30,75	5751,60	1164,13	66,24	346,00	18,70	56,27
Mallet	Meia Encosta	1	656,85	84,39	67,78	3841,21	3,96	24,70	8513,70	2647,05	391,88	385,03	13,45	196,86
Mallet	Meia Encosta	2	821,34	69,66	36,05	1831,87	4,85	26,40	9658,42	1333,13	160,21	396,49	0,00	106,73
Mallet	Meia Encosta	3	339,96	124,47	38,68	3051,47	3,70	19,60	6180,35	1732,54	314,23	210,09	0,00	139,77
Mallet	Meia Encosta	4	373,26	160,99	44,64	3738,50	3,61	30,86	7019,33	1948,53	219,55	431,27	23,57	138,15
São João do Triunfo	Topo da Catena	1	711,01	63,98	37,23	2631,75	4,62	21,79	9422,79	1960,82	80,31	760,39	0,00	35,02
São João do Triunfo	Topo da Catena	3	512,58	150,62	56,47	6277,22	5,66	57,66	8391,94	4175,56	177,72	546,93	51,42	85,92
São João do Triunfo	Topo da Catena	4	569,23	41,09	33,27	2597,57	4,81	12,82	7048,11	1549,38	47,35	456,88	0,00	37,61
São João do Triunfo	Meia Encosta	1	427,31	155,62	60,82	3314,20	3,36	14,19	8055,41	1719,54	60,27	530,20	0,00	59,93
São João do Triunfo	Meia Encosta	3	351,50	128,29	64,28	4665,43	2,98	16,52	5370,26	2584,50	77,33	302,85	6,98	41,30
São João do Triunfo	Meia Encosta	4	516,75	120,65	43,84	2504,95	5,72	19,02	8059,90	1407,46	68,35	750,99	0,00	48,86
Seara	Topo da Catena	1	417,96	156,33	33,37	3221,51	4,75	26,37	5766,87	2016,42	223,70	429,45	12,46	216,75
Seara	Topo da Catena	2	504,15	85,29	32,62	3138,17	7,10	17,67	9363,65	2034,07	259,16	621,87	6,17	155,58
Seara	Topo da Catena	3	398,99	64,93	32,55	3131,19	4,28	22,90	8311,14	1776,24	277,37	492,14	15,07	155,34
Seara	Meia Encosta	1	657,92	26,39	31,15	7515,38	3,79	28,80	9308,01	2340,69	20,70	465,78	6,69	64,37
Seara	Meia Encosta	2	707,07	145,95	35,48	6470,54	5,14	81,13	8894,91	2380,15	28,23	499,61	24,34	62,37
Seara	Meia Encosta	3	525,76	46,34	39,44	9656,71	4,43	60,06	9346,00	3052,03	35,40	584,62	47,03	89,56
Seara	Meia Encosta	4	832,64	26,36	32,39	8158,69	2,83	27,49	12381,04	2354,36	18,85	662,62	6,09	93,74



QUADRO 5 - DADOS BRUTOS DE TEOR DE ELEMENTOS EM CASCA DE MUDAS DE ERVA-MATE (mg kg<sup>-1</sup>) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL (CONTINUA)

Sítio	Posição na paisagem	Repetição	S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
(mg kg <sup>-1</sup> )														
Barão do Cotegipe	Topo da Catena	1	518,62	410,08	128,34	12359,07	9,63	564,72	12950,39	5362,13	1369,93	634,78	302,99	242,11
Barão do Cotegipe	Topo da Catena	2	582,37	946,32	150,04	10049,73	16,27	964,58	10502,98	4446,27	852,41	796,98	759,11	267,36
Barão do Cotegipe	Topo da Catena	3	613,73	872,42	174,36	14528,68	21,67	1231,37	14065,58	5042,84	911,28	1247,70	646,62	376,03
Barão do Cotegipe	Topo da Catena	4	615,54	511,14	158,98	12525,24	15,82	574,87	12612,24	4975,06	620,88	819,11	365,44	303,76
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	1	616,83	342,13	154,60	20476,88	15,77	376,31	8154,79	4662,78	100,54	696,22	269,49	344,34
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	2	672,09	395,37	144,54	19714,64	10,69	556,53	12151,62	5326,16	117,93	611,10	357,84	485,14
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	3	579,02	168,97	114,50	19550,89	15,68	243,69	14579,24	4158,48	109,99	874,27	132,04	277,44
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	4	540,98	153,36	96,73	17693,45	15,65	165,04	11729,74	5036,35	124,15	783,13	116,90	238,87
Cascavel	Topo da Catena	1	633,08	992,95	140,25	9481,80	9,32	1139,31	13901,51	5984,36	720,63	704,66	583,10	337,18
Cascavel	Topo da Catena	2	519,29	509,06	88,78	10447,27	6,22	429,85	13007,62	5893,99	1085,54	526,81	231,78	397,26
Cascavel	Topo da Catena	3	573,66	414,03	120,65	6737,21	8,42	367,89	13052,84	4851,59	850,92	564,19	188,97	246,41
Cascavel	Topo da Catena	4	520,92	160,40	139,65	7873,47	6,15	111,05	12530,82	6050,22	1002,65	585,47	64,99	250,58
Cascavel	Meia Encosta	1	685,23	278,85	102,34	22397,65	13,78	364,91	15438,95	5910,41	83,99	661,41	256,08	143,04
Cascavel	Meia Encosta	2	627,63	480,04	95,54	27033,13	18,06	727,38	11193,39	5126,67	72,88	579,11	350,16	205,16
Cascavel	Meia Encosta	3	666,37	99,69	89,88	22759,37	24,53	108,96	12166,20	6005,32	77,00	768,21	125,30	194,57
Cascavel	Meia Encosta	4	658,99	189,12	100,06	27329,46	17,43	295,15	12842,17	7289,28	60,12	882,52	143,29	168,91
Cruz Machado	Meia Encosta	1	626,85	340,37	161,65	15555,58	17,29	159,90	13243,62	6079,76	890,82	882,24	132,85	437,39
Cruz Machado	Meia Encosta	2	625,26	376,01	135,90	14417,52	12,23	260,23	15059,00	5385,73	922,72	689,09	160,42	392,73
Cruz Machado	Meia Encosta	3	584,77	557,77	122,88	11480,28	9,69	701,87	14343,19	4804,62	1105,55	657,25	372,86	318,04
Cruz Machado	Meia Encosta	4	566,20	176,14	172,48	13919,42	13,87	132,39	10429,74	6342,41	894,65	621,17	80,37	392,17
Cruz Machado	Topo da Catena	1	724,87	620,16	134,12	11813,25	10,53	400,91	14574,76	5939,63	329,87	829,97	326,69	397,57
Cruz Machado	Topo da Catena	2	542,02	816,32	124,96	10061,77	7,86	530,42	6702,43	3910,83	234,00	507,73	374,87	264,04
Cruz Machado	Topo da Catena	3	635,41	350,49	96,55	9611,81	4,26	130,96	11818,99	4708,21	606,60	672,38	80,71	308,59
Cruz Machado	Topo da Catena	4	735,25	743,66	127,68	14998,53	10,11	277,14	8240,33	5272,85	390,67	724,10	195,79	436,15
Faxinal do Céu	Topo da Catena	1	545,90	574,17	132,65	13271,27	7,30	293,31	7773,67	5024,93	109,27	690,72	312,68	199,12
Faxinal do Céu	Topo da Catena	2	766,96	944,39	148,24	14293,31	15,76	364,13	12770,33	5665,16	130,96	1050,24	422,54	361,92
Faxinal do Céu	Topo da Catena	3	539,57	715,72	130,90	13157,13	4,98	191,58	8530,88	4862,38	95,88	625,91	197,79	337,33
Faxinal do Céu	Topo da Catena	4	548,05	439,95	135,10	11546,36	11,34	173,68	9414,83	4805,06	142,21	855,62	178,74	199,04
Faxinal do Céu	Meia Encosta	1	497,81	510,52	129,99	10633,95	5,52	179,48	8153,82	3593,68	104,78	629,69	215,53	263,23

QUADRO 5 – (CONTINUAÇÃO)

Sítio	Posição na paisagem	Repetição	S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
(mg kg <sup>-1</sup> )														
Faxinal do Céu	Meia Encosta	2	706,05	740,44	207,03	14607,71	12,29	344,16	9175,60	4699,06	371,18	908,66	430,98	323,90
Faxinal do Céu	Meia Encosta	3	555,06	792,47	182,10	12443,30	9,47	366,26	6204,47	3820,64	141,54	771,92	459,27	400,20
Faxinal do Céu	Meia Encosta	4	693,68	916,51	224,64	15358,60	11,38	343,96	11621,65	4342,14	187,05	800,02	400,71	441,76
Fernandes Pinheiro	Topo da Catena	1	542,97	431,92	85,72	13043,90	13,39	297,26	10627,62	5231,81	193,80	712,39	240,23	215,46
Fernandes Pinheiro	Topo da Catena	2	512,53	480,95	77,64	12260,83	10,45	284,91	13085,70	5818,81	407,25	697,72	228,04	227,74
Fernandes Pinheiro	Topo da Catena	3	572,51	942,99	138,73	16737,41	14,67	541,71	7821,97	5483,11	264,62	700,11	407,46	283,98
Fernandes Pinheiro	Topo da Catena	4	554,85	511,23	112,01	10884,69	13,79	187,18	7615,55	5972,24	318,72	730,13	320,51	213,71
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	1	710,28	502,41	119,34	11104,01	23,00	251,59	9487,07	6466,73	513,43	888,26	380,49	247,34
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	2	524,30	345,53	96,96	11147,29	9,12	132,75	11229,59	4889,52	292,34	575,59	198,63	174,61
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	3	547,63	236,23	92,44	9133,39	12,06	86,27	12403,07	5412,47	295,50	734,39	98,15	253,93
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	4	546,93	363,61	106,05	14882,53	13,81	243,10	9446,23	6496,92	394,30	663,50	215,25	271,33
Ilópolis	Meia Encosta	1	487,92	176,00	80,20	9296,53	10,64	830,63	11970,26	3320,48	1017,09	555,21	187,21	223,64
Ilópolis	Meia Encosta	2	547,56	307,58	170,63	14380,39	14,48	188,56	10408,03	4830,95	1690,66	747,81	205,02	435,43
Ilópolis	Meia Encosta	3	672,51	318,89	141,35	11673,75	12,47	207,32	13847,35	4243,92	1738,94	821,70	220,78	467,73
Ilópolis	Meia Encosta	4	595,34	228,72	105,20	13698,61	7,64	170,28	15082,34	5227,19	1846,80	658,17	159,46	507,92
Ilópolis	Topo da Catena	1	646,63	496,29	139,12	15844,31	8,53	338,78	11331,40	4629,97	970,16	709,05	362,19	396,30
Ilópolis	Topo da Catena	2	542,62	686,08	104,41	13062,92	10,24	460,60	13797,88	4183,27	819,17	642,29	510,58	322,09
Ilópolis	Topo da Catena	3	600,15	505,34	112,55	11436,96	4,96	286,99	16121,59	3406,80	951,81	738,38	365,04	231,52
Ilópolis	Topo da Catena	4	635,10	486,96	150,85	14428,81	14,17	327,66	13602,43	4946,67	1150,38	866,71	343,53	374,88
Mallet	Topo da Catena	1	618,41	598,82	160,90	11685,74	10,84	329,49	11536,69	4146,71	232,88	785,09	363,56	270,36
Mallet	Topo da Catena	2	561,86	522,20	180,13	10162,19	10,64	256,08	8901,34	4619,25	308,48	587,19	317,73	270,60
Mallet	Topo da Catena	3	615,32	147,25	148,69	8514,42	9,16	68,35	14129,64	5223,83	273,29	847,91	65,89	175,61
Mallet	Topo da Catena	4	570,12	971,38	153,72	10509,65	9,22	525,15	9252,11	3515,25	283,88	618,26	590,42	267,46
Mallet	Meia Encosta	1	693,86	480,60	205,00	13227,35	13,00	216,48	14598,99	6451,52	1782,48	736,22	301,10	450,01
Mallet	Meia Encosta	2	1057,70	547,28	107,35	5979,52	12,39	336,79	18946,36	4848,34	716,00	1247,19	400,72	415,26
Mallet	Meia Encosta	3	592,35	922,24	126,76	11457,61	14,86	489,47	9319,45	5529,39	969,76	648,96	602,35	506,85
Mallet	Meia Encosta	4	572,61	461,35	108,53	10440,14	9,33	137,42	9264,12	4503,29	518,34	872,65	149,67	343,51
São João do Triunfo	Topo da Catena	1	602,04	525,90	123,77	10793,90	10,25	343,89	10938,87	5848,79	304,02	775,58	356,25	175,67
São João do Triunfo	Topo da Catena	2	508,21	359,36	118,63	11373,96	5,25	221,09	10338,49	5128,01	279,97	492,88	216,04	159,55
São João do Triunfo	Topo da Catena	3	554,16	802,01	100,92	12927,62	10,00	481,24	11270,64	6461,43	311,30	600,09	435,62	192,94

QUADRO 5 – (CONCLUSÃO)

Sítio	Posição na paisagem	Repetição	S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
			(mg kg <sup>-1</sup> )											
São João do Triunfo	Topo da Catena	4	543,71	434,70	116,32	11964,23	7,50	283,38	9343,75	5301,59	207,31	589,93	273,36	199,10
São João do Triunfo	Meia Encosta	1	578,30	439,71	149,19	9511,73	9,84	126,54	10233,42	4444,28	125,12	571,19	199,44	187,40
São João do Triunfo	Meia Encosta	2	674,06	322,00	123,48	8760,60	12,83	163,26	11617,29	5298,93	88,56	634,55	162,44	158,62
São João do Triunfo	Meia Encosta	3	509,49	426,64	117,77	11333,83	6,60	188,96	7151,93	3956,85	140,65	490,99	177,22	141,58
São João do Triunfo	Meia Encosta	4	553,82	314,57	150,62	12132,38	12,48	138,24	9056,33	4433,57	172,18	915,60	121,70	220,82
Seara	Topo da Catena	1	573,41	487,10	103,06	12358,61	15,90	372,15	9140,23	6082,82	725,10	673,49	288,15	467,53
Seara	Topo da Catena	2	573,37	425,05	108,36	14594,63	16,66	356,32	10229,76	5766,88	859,63	643,47	289,04	590,61
Seara	Topo da Catena	3	530,07	416,66	91,20	11315,00	8,89	363,56	12793,19	5091,43	645,64	559,54	282,05	408,02
Seara	Meia Encosta	1	595,44	275,05	82,38	25396,98	8,19	559,30	11551,69	5199,65	68,30	759,16	276,64	207,06
Seara	Meia Encosta	2	545,14	113,41	76,62	17476,91	10,03	190,73	13507,13	5166,87	74,24	750,32	101,86	165,05
Seara	Meia Encosta	3	636,12	390,96	81,61	21285,94	10,00	586,57	12461,22	5777,85	97,12	906,83	371,69	231,65
Seara	Meia Encosta	4	644,80	290,54	79,17	25372,70	7,41	389,95	12011,81	5053,53	82,82	717,04	270,43	291,10

QUADRO 6 - DADOS BRUTOS DE TEOR DE ELEMENTOS EM LENHO DE MUDAS DE ERVA-MATE (mg kg<sup>-1</sup>) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL (CONTINUA)

Sítio	Posição na paisagem	Repetição	S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
			(mg kg <sup>-1</sup> )											
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	1	142,81	158,29	9,94	498,73	3,92	70,27	2765,17	745,71	278,38	287,68	72,34	242,04
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	2	182,01	55,28	15,34	589,06	3,60	47,89	4349,96	723,87	284,37	831,27	24,20	44,56
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	3	373,47	73,12	12,86	393,64	3,70	26,95	4689,86	482,25	199,99	856,05	52,17	28,26
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	4	199,69	105,98	17,00	913,98	4,42	32,29	4157,04	629,10	161,48	724,48	11,72	123,39
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	1	371,99	83,30	18,49	2288,97	4,29	173,55	2318,10	888,79	17,94	414,44	85,10	194,07
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	2	354,64	38,35	20,87	2835,80	2,70	42,63	4106,32	794,35	18,04	380,39	32,27	274,41
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	3	543,24	8,13	12,78	1489,22	5,19	32,59	7220,89	639,65	29,49	1649,14	25,53	57,88
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	4	457,61	5,47	8,91	1047,33	3,74	15,49	5926,07	502,83	20,51	1218,17	6,11	19,89
Cascavel	Topo de Catena	1	415,08	146,87	10,68	471,47	2,72	90,21	4597,65	604,21	118,74	341,16	95,68	49,02
Cascavel	Topo de Catena	2	182,57	199,93	11,02	782,18	2,64	80,77	5003,90	657,60	226,56	203,09	29,81	115,75
Cascavel	Topo de Catena	3	325,99	44,61	13,43	449,85	2,35	24,99	3624,24	656,67	184,38	180,64	51,87	19,92
Cascavel	Topo de Catena	4	318,31	52,90	14,31	635,63	2,41	16,67	3992,87	861,52	185,99	186,82	14,34	38,38

QUADRO 6 – (CONTINUAÇÃO)

Sítio	Posição na paisagem	Repetição	S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
(mg kg <sup>-1</sup> )														
Cascavel	Meia Encosta	1	479,76	2,61	10,07	1875,49	4,93	14,49	8678,44	814,25	15,20	275,29	13,32	22,36
Cascavel	Meia Encosta	2	473,14	10,93	4,83	1570,81	7,50	129,17	7035,50	399,54	8,27	669,94	10,17	20,54
Cascavel	Meia Encosta	3	376,44	10,10	7,10	1154,76	8,32	60,02	7178,24	815,82	15,32	619,17	13,31	20,00
Cascavel	Meia Encosta	4	427,79	3,40	5,87	1184,05	6,75	15,24	7570,63	930,69	10,70	819,81	15,56	18,29
Cruz Machado	Meia Encosta	1	233,14	123,14	15,66	967,51	2,32	15,88	2718,55	675,25	138,64	232,64	7,09	82,37
Cruz Machado	Meia Encosta	2	453,49	147,09	10,98	1170,25	9,75	117,85	3971,36	580,75	156,58	433,87	73,21	100,35
Cruz Machado	Meia Encosta	3	215,09	298,32	9,26	516,03	3,58	32,46	2839,16	896,64	202,05	168,75	7,94	231,30
Cruz Machado	Meia Encosta	4	212,16	39,19	15,82	494,69	4,05	13,27	3876,69	713,76	263,14	216,83	10,40	28,97
Cruz Machado	Topo de Catena	1	256,26	165,88	12,12	611,41	3,65	58,31	6928,70	499,16	54,76	360,95	50,28	32,08
Cruz Machado	Topo de Catena	2	151,34	161,38	8,63	378,01	2,71	97,01	1968,11	252,89	36,86	215,67	34,63	14,47
Cruz Machado	Topo de Catena	3	382,99	246,57	11,34	617,32	2,76	118,18	3665,20	635,14	124,84	219,50	20,38	66,25
Cruz Machado	Topo de Catena	4	249,90	260,34	10,53	928,00	3,06	18,44	3674,22	491,97	53,78	374,49	73,82	58,30
Faxinal do Céu	Topo de Catena	1	165,89	111,37	12,63	881,58	2,74	42,26	2824,49	535,36	24,53	322,46	16,52	25,63
Faxinal do Céu	Topo de Catena	2	313,54	361,03	13,66	787,69	5,16	19,64	5057,80	536,42	16,76	855,03	12,15	60,63
Faxinal do Céu	Topo de Catena	3	151,28	245,81	10,62	782,02	2,65	31,30	2304,44	548,50	21,73	365,44	7,13	44,99
Faxinal do Céu	Topo de Catena	4	192,93	203,14	12,04	783,86	4,16	124,72	1879,96	467,11	22,73	179,04	38,14	172,77
Faxinal do Céu	Meia Encosta	1	202,16	679,63	15,05	1138,66	64,54	220,20	2228,16	493,83	27,05	443,77	204,90	119,94
Faxinal do Céu	Meia Encosta	2	252,13	195,45	14,97	1206,32	3,70	35,86	3267,22	619,56	39,20	362,10	13,55	86,33
Faxinal do Céu	Meia Encosta	3	193,24	131,13	18,92	861,08	2,39	33,52	2372,60	482,74	31,33	405,99	80,94	40,23
Faxinal do Céu	Meia Encosta	4	200,21	391,00	16,54	508,62	2,96	21,91	2416,30	265,43	26,00	541,79	61,71	71,54
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	1	749,74	118,18	15,53	1244,31	7,88	72,12	4689,93	1534,28	67,42	471,11	16,40	88,37
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	2	410,28	172,63	14,44	1229,92	2,20	50,65	4902,37	863,64	50,35	1071,97	47,87	40,56
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	3	493,70	90,86	13,41	1220,15	5,70	11,11	2593,33	874,77	48,55	387,64	8,20	173,60
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	4	495,65	49,73	11,54	1104,43	4,86	27,70	5613,40	1133,74	93,02	1298,32	15,86	52,45
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	1	512,77	68,25	7,02	391,44	6,09	47,19	6482,27	994,11	44,85	1408,24	76,74	65,71
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	2	208,81	75,89	3,31	221,68	2,52	6,78	4823,78	891,08	94,07	1127,48	4,68	28,98
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	3	637,29	81,73	9,05	784,57	3,10	17,08	4760,05	819,87	44,03	916,04	9,97	45,74
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	4	514,89	123,25	13,77	900,22	4,35	27,33	4592,76	864,21	62,98	669,68	6,39	49,74
Ilópolis	Meia Encosta	1	174,31	119,15	8,12	458,44	33,19	120,68	3524,19	343,51	183,68	403,35	20,11	126,86
Ilópolis	Meia Encosta	2	313,31	86,29	17,53	1233,68	3,46	23,61	3627,62	726,54	375,94	402,62	13,07	152,00

QUADRO 6 – (CONCLUSÃO)

Sítio	Posição na paisagem	Repetição	S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
(mg kg <sup>-1</sup> )														
Ilópolis	Meia Encosta	3	299,49	92,05	12,33	387,49	3,47	82,17	5505,35	477,07	392,00	889,98	20,58	83,45
Ilópolis	Meia Encosta	4	301,50	78,10	8,38	743,20	2,31	26,96	6844,61	415,68	230,18	425,94	7,53	83,18
Ilópolis	Topo de Catena	1	217,92	154,73	9,56	515,59	2,01	61,35	6231,17	536,00	237,68	365,13	81,98	77,91
Ilópolis	Topo de Catena	2	259,64	99,72	8,20	1350,10	3,64	42,67	4339,09	561,46	167,04	426,83	61,54	56,59
Ilópolis	Topo de Catena	3	231,54	45,41	9,33	664,27	1,96	42,15	6078,05	480,77	257,31	326,27	30,81	16,16
Ilópolis	Topo de Catena	4	469,38	193,67	10,80	892,01	4,29	100,99	3541,53	655,26	157,12	320,11	85,10	229,33
Mallet	Topo de Catena	1	206,67	181,89	15,22	555,50	4,16	27,31	4650,18	334,63	43,20	397,41	15,38	18,43
Mallet	Topo de Catena	2	375,30	153,12	21,94	828,92	4,02	35,08	3447,82	754,33	52,19	511,50	55,28	58,37
Mallet	Topo de Catena	3	519,08	100,66	16,74	618,28	3,09	17,31	4638,12	625,20	41,30	801,39	14,50	21,76
Mallet	Topo de Catena	4	135,95	126,78	12,24	304,19	1,90	109,84	1944,08	249,59	45,36	235,60	23,81	11,24
Mallet	Meia Encosta	1	279,14	108,57	15,73	723,15	3,74	25,32	3345,31	730,13	197,21	211,08	32,04	138,95
Mallet	Meia Encosta	2	799,26	69,16	24,36	665,98	5,33	29,94	10908,00	1481,68	162,55	981,67	52,39	131,17
Mallet	Meia Encosta	3	174,03	180,89	9,82	479,71	2,64	19,45	3444,78	480,39	140,48	201,95	15,11	164,80
Mallet	Meia Encosta	4	147,28	102,64	8,38	416,30	2,18	49,62	4543,19	454,71	144,70	381,44	15,08	30,23
São João do Triunfo	Topo de Catena	1	194,61	55,61	10,20	321,42	2,87	67,56	4710,08	429,31	35,94	519,81	15,44	6,59
São João do Triunfo	Topo de Catena	2	196,96	82,31	17,66	889,85	1,90	47,97	2994,02	636,48	51,92	243,91	48,36	38,15
São João do Triunfo	Topo de Catena	3	261,78	105,20	8,60	649,91	3,18	18,85	6173,18	602,36	50,04	671,39	6,63	28,91
São João do Triunfo	Topo de Catena	4	308,41	99,26	11,19	682,31	2,50	37,12	3717,14	465,29	39,31	489,76	43,34	52,67
São João do Triunfo	Meia Encosta	1	190,18	216,30	19,19	827,78	2,01	13,29	3336,00	498,07	27,98	527,36	6,50	43,91
São João do Triunfo	Meia Encosta	2	543,94	50,85	20,49	901,77	1,96	21,40	1971,39	856,39	17,39	314,36	10,40	27,63
São João do Triunfo	Meia Encosta	3	137,07	143,44	11,53	507,29	1,54	17,76	1824,40	397,58	27,92	273,79	1,90	8,51
São João do Triunfo	Meia Encosta	4	320,71	211,46	18,11	1116,58	3,62	617,91	3839,79	458,22	35,99	723,71	23,21	85,23
Seara	Topo de Catena	1	214,54	122,73	7,20	662,06	3,61	24,01	3673,32	769,84	200,65	515,72	95,78	102,08
Seara	Topo de Catena	2	255,46	133,04	14,12	1122,54	4,30	63,55	5700,01	826,07	226,55	614,45	28,88	146,72
Seara	Topo de Catena	3	164,46	166,75	8,48	598,08	11,74	87,00	3223,33	522,55	122,12	242,72	66,08	237,32
Seara	Meia Encosta	1	255,57	11,08	5,19	798,86	2,99	13,17	5920,08	803,84	14,04	343,97	76,52	21,28
Seara	Meia Encosta	2	239,70	0,88	7,45	1410,51	3,30	15,10	5329,68	809,27	21,79	451,57	15,52	25,94
Seara	Meia Encosta	3	293,04	19,51	9,18	2771,45	2,98	44,93	3303,71	934,24	13,20	223,18	54,39	182,23
Seara	Meia Encosta	4	323,94	2,42	3,76	834,60	2,34	14,08	7044,65	670,45	10,84	773,66	15,43	27,56

QUADRO 7 - DADOS BRUTOS DE TEOR DE ELEMENTOS EM RAIZ DE MUDAS DE ERVA-MATE (mg kg<sup>-1</sup>) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL (CONTINUA)

Sítio	Posição na paisagem	Repetição	(mg kg <sup>-1</sup> )											
			S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	1	1739,94	559,69	62,53	3105,97	19,00	643,40	9286,28	3867,68	184,68	1254,85	461,36	255,59
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	2	2012,40	766,15	31,98	2637,41	19,86	787,78	9343,67	4477,82	322,93	773,03	570,09	234,83
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	3	2276,67	559,06	42,00	2636,62	8,70	181,12	10787,53	3733,85	379,29	712,55	291,10	172,48
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	4	2526,97	1009,70	66,78	2229,18	31,39	1039,76	10602,50	5135,83	259,94	1333,04	806,45	189,91
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	1	3374,56	276,25	50,57	7163,67	40,47	446,71	10593,49	3470,04	34,73	971,71	336,65	211,32
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	2	2842,29	408,68	71,86	7889,82	23,09	553,31	12663,27	3967,92	114,50	1253,36	370,55	245,64
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	3	3459,05	381,19	92,86	7802,85	18,07	608,37	12013,89	3183,59	46,61	732,28	401,16	234,18
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	4	2595,02	167,17	64,21	5232,09	21,54	269,32	8298,97	3764,18	25,35	845,61	243,12	168,54
Cascavel	Topo de Catena	1	2629,29	1623,89	136,90	3303,61	9,93	758,03	7083,11	2284,15	36,90	740,16	897,24	164,21
Cascavel	Topo de Catena	2	2809,31	1382,73	41,56	2079,13	37,31	1307,18	6158,29	4342,99	221,99	585,93	714,97	133,31
Cascavel	Topo de Catena	3	2658,45	902,99	33,00	1996,66	21,97	840,33	9737,16	4197,68	251,45	667,22	437,63	168,09
Cascavel	Topo de Catena	4	3292,23	1624,16	38,11	2181,94	56,11	1647,58	9592,14	5668,06	278,71	741,42	816,05	205,34
Cascavel	Meia Encosta	1	4410,49	1573,40	37,50	5391,24	67,23	2171,61	13157,76	6439,91	47,35	1457,87	1091,41	103,17
Cascavel	Meia Encosta	2	3620,65	657,82	39,69	10208,47	32,60	875,74	9815,93	4695,72	35,92	909,89	447,87	109,49
Cascavel	Meia Encosta	3	4410,48	745,33	40,45	6653,52	60,11	1030,77	12708,21	6392,25	36,23	1225,48	549,81	103,02
Cascavel	Meia Encosta	4	3643,00	650,35	40,24	6297,50	40,18	963,17	11580,67	4243,16	47,82	689,55	405,17	66,58
Cruz Machado	Meia Encosta	1	2338,70	789,09	79,21	2448,16	20,59	801,33	9787,11	6106,23	311,18	794,77	564,22	173,28
Cruz Machado	Meia Encosta	2	2036,60	849,80	58,73	3403,32	23,60	809,03	8456,45	6626,85	536,52	861,25	588,80	231,91
Cruz Machado	Meia Encosta	3	2392,82	472,80	56,83	2760,56	22,91	441,08	8935,79	4773,86	263,28	686,31	272,19	219,99
Cruz Machado	Meia Encosta	4	2542,16	419,97	44,49	2533,86	27,31	361,63	9349,50	4921,11	309,07	792,63	220,81	216,04
Cruz Machado	Topo de Catena	1	2697,41	1202,76	38,43	3043,00	19,77	765,81	8028,63	3870,32	130,59	727,98	516,42	259,63
Cruz Machado	Topo de Catena	2	2660,61	707,58	69,10	2724,98	28,40	412,85	6270,23	3012,60	99,56	541,30	362,51	192,49
Cruz Machado	Topo de Catena	3	2697,04	914,28	44,48	2079,37	16,68	576,40	11255,29	3589,11	127,15	645,40	404,06	195,56
Cruz Machado	Topo de Catena	4	2268,94	1223,28	60,97	3448,47	18,86	647,55	8459,72	3658,25	195,16	412,43	511,60	220,39
Faxinal do Céu	Topo de Catena	1	2409,51	929,38	73,10	3834,66	12,66	391,08	7318,30	3111,46	35,77	730,98	463,34	165,39
Faxinal do Céu	Topo de Catena	2	3031,41	1358,85	49,92	2888,41	22,68	632,36	9162,12	3010,81	53,94	814,00	800,95	163,41
Faxinal do Céu	Topo de Catena	3	3107,45	1104,12	52,76	3063,73	21,20	561,46	9497,81	2786,18	45,72	717,45	634,76	145,05
Faxinal do Céu	Topo de Catena	4	3305,68	481,87	38,78	7723,61	15,98	724,13	12173,91	5086,23	41,61	1387,06	489,76	133,40
Faxinal do Céu	Meia Encosta	1	3681,34	2102,34	156,89	3856,22	17,18	1030,39	7241,26	3340,36	85,34	1027,44	1282,42	208,43



QUADRO 7 – (CONTINUAÇÃO)

Sítio	Posição na paisagem	Repetição	(mg kg <sup>-1</sup> )											S
			Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn	
Faxinal do Céu	Meia Encosta	2	2813,90	987,59	125,95	3967,80	12,82	333,98	7153,09	3315,21	51,78	839,00	377,13	167,45
Faxinal do Céu	Meia Encosta	3	3141,07	400,69	34,13	8788,03	9,57	598,82	10883,91	4415,11	28,61	1018,89	390,63	167,59
Faxinal do Céu	Meia Encosta	4	2036,73	853,44	75,45	2765,57	28,59	919,27	9822,53	3845,61	190,55	936,47	697,38	197,56
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	1	3451,77	2156,73	31,10	3397,30	29,06	1123,11	9212,52	4842,84	85,62	844,63	920,21	174,62
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	2	3395,12	2704,13	47,04	4133,51	30,33	1352,68	10633,82	5694,34	85,65	1131,76	1061,78	196,88
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	3	3220,42	1961,08	36,99	4053,71	32,76	2112,65	11011,24	4454,90	91,90	798,99	888,46	131,57
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	4	3162,05	1066,47	27,99	4178,81	27,20	563,19	10213,57	5324,54	103,26	891,86	413,97	180,43
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	1	2857,47	2084,37	50,13	3075,96	38,16	677,53	9418,42	4098,85	90,19	777,13	1147,63	108,85
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	2	2723,55	1311,17	51,29	3574,60	39,06	475,09	7868,47	4264,72	90,94	837,66	1019,69	140,07
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	3	2421,94	1102,63	48,66	2912,94	25,24	381,77	11559,59	3294,01	93,60	685,10	715,73	66,52
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	4	2540,12	1632,65	37,49	2839,04	29,28	542,99	5857,10	3956,32	76,80	730,05	1199,31	134,06
Ilópolis	Meia Encosta	1	3147,32	1231,83	51,28	2502,92	33,97	534,05	10317,61	5290,96	517,90	1257,04	946,91	283,77
Ilópolis	Meia Encosta	2	3746,11	955,15	34,64	2840,99	21,99	414,72	14405,70	4463,12	445,92	975,34	647,13	245,45
Ilópolis	Meia Encosta	3	3089,64	553,52	30,88	2236,17	19,53	244,41	11159,61	3863,57	293,98	1021,87	432,26	194,87
Ilópolis	Meia Encosta	4	2670,67	702,22	64,00	2974,67	14,04	291,94	9320,67	3917,35	364,69	853,43	499,12	203,49
Ilópolis	Topo de Catena	1	2542,95	583,20	43,30	3177,75	11,43	187,57	10344,85	3691,65	274,71	569,15	347,69	169,23
Ilópolis	Topo de Catena	2	3429,43	656,35	29,30	2656,70	17,97	268,63	13639,91	4340,11	257,37	995,10	532,65	179,51
Ilópolis	Topo de Catena	4	2786,85	774,27	47,31	3179,40	11,90	282,59	12257,68	4320,19	253,23	1058,87	479,01	167,70
Mallet	Topo de Catena	1	3370,90	1259,55	81,95	2898,43	26,02	504,40	7630,55	3173,29	113,80	650,67	804,80	135,21
Mallet	Topo de Catena	2	2818,88	2169,37	95,91	2600,79	29,80	1075,65	7829,70	2757,17	95,49	713,28	1237,53	114,86
Mallet	Topo de Catena	3	3244,32	1625,73	84,38	2513,95	36,32	724,19	8846,34	2869,00	171,60	797,12	954,08	119,68
Mallet	Topo de Catena	4	3015,26	1187,64	78,45	2739,44	24,80	442,80	4730,98	2874,49	89,03	589,82	712,85	126,99
Mallet	Meia Encosta	1	2977,00	1131,99	70,99	2888,75	25,10	470,32	7321,92	3969,32	234,21	532,45	761,81	294,79
Mallet	Meia Encosta	2	2517,02	2786,22	53,21	2013,83	26,54	1259,77	3968,49	2630,16	312,62	462,17	1356,69	177,98
Mallet	Meia Encosta	3	2653,97	1632,27	43,13	2693,37	40,48	757,61	7083,09	4570,57	246,48	663,50	987,87	240,98
Mallet	Meia Encosta	4	2613,39	1700,79	41,40	2653,22	25,37	804,12	8888,31	4211,95	203,12	693,40	1323,12	217,61
São João do Triunfo	Topo de Catena	1	2840,98	733,28	40,25	3031,79	25,55	340,54	9300,28	4782,37	81,60	710,25	442,99	147,45
São João do Triunfo	Topo de Catena	2	2543,41	472,73	39,50	2275,69	36,11	293,81	7132,26	3806,26	74,31	614,83	225,11	73,71
São João do Triunfo	Topo de Catena	3	2752,37	417,90	40,70	2500,52	27,46	182,93	6942,00	3699,66	58,56	583,86	241,38	116,18
São João do Triunfo	Topo de Catena	4	2048,28	939,39	43,38	2590,51	15,72	691,93	10260,01	3461,68	84,09	616,67	422,54	82,20



QUADRO 7 – (CONCLUSÃO)

Sítio	Posição na paisagem	Repetição	(mg kg <sup>-1</sup> )											
			S	Al	Ba	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
São João do Triunfo	Meia Encosta	1	2961,41	680,13	87,49	3297,43	29,31	718,82	8743,18	2720,72	56,01	755,44	342,81	109,13
São João do Triunfo	Meia Encosta	2	2553,82	728,53	72,86	3137,16	23,40	871,66	8421,41	2676,36	53,41	818,73	257,97	97,73
São João do Triunfo	Meia Encosta	3	2656,27	411,85	60,04	2298,43	17,57	291,31	6715,32	2526,53	47,27	592,27	174,55	88,20
São João do Triunfo	Meia Encosta	4	2281,58	433,94	78,74	2692,83	16,97	773,46	8555,02	2367,32	49,58	596,62	206,38	59,39
Seara	Topo de Catena	1	2653,92	1169,34	40,86	3275,26	25,69	1606,36	8641,71	4923,63	175,78	992,44	1005,55	301,48
Seara	Topo de Catena	2	2579,57	703,58	32,62	2279,37	28,53	853,84	9109,99	4312,02	195,43	753,07	572,53	282,76
Seara	Topo de Catena	3	2682,02	2028,67	35,37	2690,22	40,91	2986,27	10200,88	6098,60	187,01	817,27	1265,85	317,64
Seara	Meia Encosta	1	3521,43	441,66	37,79	8095,42	13,94	657,89	11677,30	5412,07	43,89	1125,63	439,77	161,90
Seara	Meia Encosta	2	3520,25	655,01	41,94	7014,17	15,85	1082,04	13062,13	5859,19	41,28	1341,93	670,48	114,12
Seara	Meia Encosta	3	2743,25	1743,91	48,53	2349,95	24,42	1797,80	7781,55	5512,64	200,89	649,25	882,06	166,47
Seara	Meia Encosta	4	3501,05	2113,84	110,22	2989,95	15,48	973,24	8178,55	3124,43	69,45	843,54	976,87	226,36

QUADRO 8 - DADOS BRUTOS DE MATERIA SECA TOTAL E POR FRAÇÃO DE ERVA-MATE (mg kg<sup>-1</sup>) CULTIVADAS EM 18 SOLOS ORIUNDOS DE REGIÃO DE ERVAIS NATIVOS, NO SUL DO BRASIL (CONTINUA)

Locais	Intemperismo	Repetição	Folha Madura	Folha Jovem	Ramo Jovem	Ramo Maduro	Casca	Lenho	Raiz	Total da Planta
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	1	9,43	6,51	5,03	12,82	2,67	11,69	15,99	64,14
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	2	11,90	8,24	8,50	11,33	2,32	7,18	20,05	69,52
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	3	26,17	8,08	5,26	11,20	1,19	3,47	9,15	64,52
Barão do Cotegipe	Topo de Catena	4	16,03	14,61	7,53	1,80	1,52	2,72	16,59	60,80
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	1	6,66	4,34	8,84	8,90	1,34	2,63	22,03	54,74
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	2	10,53	-	2,41	0,84	0,73	0,95	13,94	29,40
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	3	7,16	-	5,59	-	1,90	2,78	8,06	25,49
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	4	33,61	-	6,44	10,43	1,28	2,95	9,72	64,43
Cascavel	Topo de Catena	1	14,01	2,42	3,57	3,33	0,72	2,94	10,79	37,78
Cascavel	Topo de Catena	2	3,71	5,36	2,15	-	0,48	0,93	8,66	21,29

QUADRO 8 – (CONTINUAÇÃO)

Locais	Intemperismo	Repetição	Folha Madura	Folha Jovem	Ramo Jovem	Ramo Maduro	Casca	Lenho	Raiz	Total da Planta
Cascavel	Topo de Catena	3	9,17	6,81	2,47	3,14	0,79	2,35	6,60	31,33
Cascavel	Topo de Catena	4	9,60	7,01	4,33	2,64	0,59	1,98	7,70	33,85
Cascavel	Meia Encosta	1	4,44	8,21	1,89	0,59	1,09	1,50	10,96	28,68
Cascavel	Meia Encosta	2	7,42	4,29	4,50	5,83	1,27	2,58	12,79	38,68
Cascavel	Meia Encosta	3	6,55	6,15	7,45	5,59	0,56	1,18	14,11	41,59
Cascavel	Meia Encosta	4	14,02	10,54	3,30	7,73	0,79	2,27	8,70	47,35
Cruz Machado	Meia Encosta	1	41,44	8,20	9,64	20,37	1,57	4,84	23,58	109,64
Cruz Machado	Meia Encosta	2	33,91	6,67	6,73	15,77	1,68	5,31	17,63	87,70
Cruz Machado	Meia Encosta	3	40,38	-	11,92	18,62	1,83	5,19	28,13	106,07
Cruz Machado	Meia Encosta	4	10,04	7,35	6,88	21,68	1,70	5,89	23,17	76,71
Cruz Machado	Topo de Catena	1	8,74	1,58	2,39	1,32	0,80	1,56	7,65	24,04
Cruz Machado	Topo de Catena	2	17,02	2,37	3,34	5,03	1,26	2,61	12,41	44,04
Cruz Machado	Topo de Catena	3	12,97	-	3,08	3,89	0,51	1,70	7,70	29,85
Cruz Machado	Topo de Catena	4	5,88	-	2,09	5,07	0,26	1,84	7,25	22,39
Faxinal do Céu	Topo de Catena	1	12,31	4,56	4,43	1,52	1,44	3,14	8,63	36,03
Faxinal do Céu	Topo de Catena	2	14,47	2,72	7,49	1,62	1,01	1,92	10,87	40,10
Faxinal do Céu	Topo de Catena	3	4,99	5,94	6,32	0,78	0,87	1,98	12,13	33,01
Faxinal do Céu	Topo de Catena	4	5,48	6,37	5,06	4,17	0,79	2,35	22,91	47,13
Faxinal do Céu	Meia Encosta	1	11,45	3,61	5,75	5,92	1,05	2,72	13,45	43,95
Faxinal do Céu	Meia Encosta	2	4,78	5,63	6,70	4,74	1,02	2,67	9,72	35,26
Faxinal do Céu	Meia Encosta	3	17,38	5,55	6,56	6,80	0,84	2,16	12,03	51,32
Faxinal do Céu	Meia Encosta	4	4,78	2,29	6,58	1,83	0,95	2,73	11,96	31,12
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	1	14,75	1,15	6,80	6,12	1,14	1,80	20,30	52,07
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	2	12,04	4,37	11,70	10,27	0,72	5,06	14,31	58,47
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	3	18,58	4,27	8,70	3,75	1,01	2,25	17,87	56,43

QUADRO 8 – (CONTINUAÇÃO)

Locais	Intemperismo	Repetição	Folha Madura	Folha Jovem	Ramo Jovem	Ramo Maduro	Casca	Lenho	Raiz	Total da Planta
Fernandes Pinheiro	Topo de Catena	4	8,45	-	7,33	8,71	0,95	3,53	20,40	49,37
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	1	11,18	4,19	11,45	5,33	1,12	2,00	7,75	43,02
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	2	7,84	-	2,14	2,76	1,65	1,09	10,77	26,25
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	3	18,83	-	6,10	-	1,26	2,17	7,83	36,19
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	4	6,79	-	4,72	-	1,67	1,37	13,55	28,10
Ilópolis	Meia Encosta	1	9,58	-	7,45	5,77	2,90	6,34	13,43	45,47
Ilópolis	Meia Encosta	2	7,26	11,96	7,93	7,31	1,49	3,73	8,23	47,91
Ilópolis	Meia Encosta	3	15,15	6,55	3,62	7,06	1,68	4,82	21,32	60,20
Ilópolis	Meia Encosta	4	6,38	3,64	2,21	-	1,00	1,65	18,53	33,41
Ilópolis	Topo de Catena	1	15,93	1,41	4,64	9,30	0,90	2,84	19,04	54,06
Ilópolis	Topo de Catena	2	21,32	12,47	9,27	10,62	1,10	2,47	18,79	76,04
Ilópolis	Topo de Catena	3	33,13	6,03	7,35	13,75	2,57	8,04	18,91	89,78
Ilópolis	Topo de Catena	4	37,52	12,79	10,42	13,85	1,71	5,79	20,14	102,22
Mallet	Topo de Catena	1	14,94	2,05	6,54	2,25	0,95	2,61	13,14	42,48
Mallet	Topo de Catena	2	8,54	-	3,18	3,16	1,20	2,53	11,95	30,56
Mallet	Topo de Catena	3	7,14	-	3,00	2,95	0,60	1,09	10,99	25,77
Mallet	Topo de Catena	4	13,12	7,73	6,02	4,27	0,98	2,45	10,87	45,44
Mallet	Meia Encosta	1	12,47	1,98	1,22	6,32	1,01	2,32	10,12	35,44
Mallet	Meia Encosta	2	0,00	9,32	3,01	3,80	0,91	2,18	7,10	26,32
Mallet	Meia Encosta	3	11,61	6,21	3,04	2,06	0,75	1,38	11,07	36,12
Mallet	Meia Encosta	4	13,36	5,14	6,76	5,65	1,36	3,49	10,27	46,03
São João do Triunfo	Topo de Catena	1	12,61	0,69	2,41	3,57	0,85	2,89	14,61	37,63
São João do Triunfo	Topo de Catena	2	2,62	3,09	0,38	-	0,37	0,65	12,95	20,06
São João do Triunfo	Topo de Catena	3	17,28	-	2,02	3,73	0,28	1,27	13,52	38,10
São João do Triunfo	Topo de Catena	4	14,53	2,38	3,64	4,19	0,48	2,60	4,99	32,81

QUADRO 8 – (CONCLUSÃO)

Locais	Intemperismo	Repetição	Folha Madura	Folha Jovem	Ramo Jovem	Ramo Maduro	Casca	Lenho	Raiz	Total da Planta
São João do Triunfo	Meia Encosta	1	3,57	-	0,90	0,44	0,63	0,35	8,65	14,54
São João do Triunfo	Meia Encosta	2	2,68	-	0,33	-	0,01	0,19	2,67	5,88
São João do Triunfo	Meia Encosta	3	7,34	2,90	1,69	1,46	0,57	1,13	9,62	24,71
São João do Triunfo	Meia Encosta	4	8,74	1,88	2,80	0,41	0,20	1,13	5,80	20,96
Seara	Topo de Catena	1	15,90	6,62	7,61	2,20	1,78	3,78	10,85	48,74
Seara	Topo de Catena	2	8,24	3,69	4,30	4,64	1,42	2,96	14,79	40,04
Seara	Topo de Catena	3	9,17	4,56	7,65	7,71	1,57	5,71	13,70	50,07
Seara	Meia Encosta	1	8,00	6,53	15,64	9,52	2,25	6,30	22,49	70,73
Seara	Meia Encosta	2	38,07	6,62	17,05	18,93	1,37	7,95	32,73	122,72
Seara	Meia Encosta	3	6,91	16,59	11,56	9,35	1,87	4,50	9,15	59,93
Seara	Meia Encosta	4	18,76	10,36	4,62	9,74	1,15	3,05	8,51	56,19

QUADRO 9 - TEORES DE ELEMENTOS (mg kg<sup>-1</sup>) SOLÚVEIS EM ÁGUA DOS 18 SOLOS DE FRAGMENTOS FLORESTAIS SOB ERVAIS NATIVOS (0-20 cm), REPRESENTATIVOS DA REGIÃO DE ORIGEM DA ERVA-MATE NO SUL DO BRASIL (CONTINUA)

Sítio	Posição na Paisagem	Rocha de origem	S	Al	Ba	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
Cascavel	Meia Encosta	Basalto	20,60	5,48	0,73	0,07	4,29	53,75	75,91	4,11	1,44	15,54	0,19
Cascavel	Topo da Catena	Basalto	5,64	0,43	0,33	0,02	0,16	19,24	24,36	6,63	0,62	4,52	0,01
Seara	Meia Encosta	Basalto	25,24	1,08	0,79	0,06	0,80	105,06	82,58	5,92	2,62	12,55	0,30
Seara	Topo da Catena	Basalto	6,44	5,76	0,12	0,03	4,29	15,19	10,77	3,59	1,03	12,26	0,00
São João do Triunfo	Meia Encosta	Arenito	4,43	2,61	0,13	0,01	0,63	10,99	9,09	1,19	0,14	0,73	0,04
São João do Triunfo	Topo da Catena	Arenito	6,79	1,70	0,18	0,01	0,49	27,71	30,15	2,49	0,13	1,57	0,03
Faxinal do Céu	Meia Encosta	Riodacito	5,94	16,21	0,64	0,01	4,49	28,15	20,18	3,50	0,42	2,66	0,25
Faxinal do Céu	Topo da Catena	Riodacito	4,95	6,90	0,28	0,01	2,37	23,75	14,63	2,96	0,32	2,72	0,17
Mallet	Meia Encosta	Folhelho	6,00	0,68	0,22	0,01	0,15	13,54	12,60	12,81	0,43	4,67	0,11
Mallet	Topo da Catena	Folhelho	11,24	7,64	0,40	0,02	2,35	24,62	16,18	6,66	0,52	3,60	0,14

QUADRO 9 – (CONCLUSÃO)

Sítio	Posição na Paisagem	Rocha de origem	S	Al	Ba	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Si	Zn
Barão do Cotegipe	Meia Encosta	Basalto	16,02	1,37	1,67	0,03	1,07	113,49	54,72	15,30	0,88	15,36	0,11
Barão do Cotegipe	Topo da Catena	Basalto	7,73	11,13	0,08	0,03	8,89	19,64	19,46	7,68	0,59	17,04	0,01
Fernandes Pinheiro	Meia Encosta	Argilito	7,65	1,14	0,31	0,01	0,26	24,78	21,60	1,58	0,45	5,27	0,04
Fernandes Pinheiro	Topo da Catena	Argilito	8,88	27,82	0,12	0,02	10,46	59,28	42,06	2,03	0,34	12,08	0,03
Cruz Machado	Meia Encosta	Basalto	14,42	29,25	0,18	0,15	13,06	44,41	16,03	5,47	2,73	28,40	0,05
Cruz Machado	Topo da Catena	Basalto	6,93	3,65	0,17	0,03	1,20	19,51	14,52	2,21	0,32	4,42	0,07
Ilópolis	Meia Encosta	Riodacito	12,60	1,27	0,59	0,01	0,17	67,56	40,94	39,38	0,65	3,21	0,35
Ilópolis	Topo da Catena	Riodacito	11,73	2,98	0,38	0,00	0,46	79,72	34,18	12,31	0,88	3,44	0,19